Modélisation hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment avec le matériau de chanvre

par

Aguérata KABORE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE CONCENTRATION : ÉNERGIE
RENOUVELABLE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M.Sc.A

MONTRÉAL, LE 20 JANVIER 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

< Aguérata KABORE, 2019>

Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Maref Wahid, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Claudiane Ouellet-Plamondon, codirectrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Hakim Bouzid, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Perraton, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 03 DÉCEMBRE 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon directeur M. Wahid MAREF et ma codirectrice Mme Claudiane OUELLET-PLAMONDON d'avoir accepté d'être mes encadreurs. Je les remercie également pour m'avoir bien orienté, supervisé et conseillé pendant toute la durée de ce travail de recherche et d'avoir contribué à mon épanouissement scientifique.

Mes remerciements s'adressent également à :

L'équipe du Programme canadien de la Bourse Francophonie (PCBF) de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet dans une université prestigieuse tel que l'École de Technologie Supérieure (ÉTS), Mr. Bouzid Hakim et Mr. Perraton Daniel d'avoir accepté agir entant que président du jury et membre du jury.

Mon Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche en Sciences exactes et appliquées (UFR/SEA), Professeur Dieudonné Joseph BATHIEBO, d'avoir donné son accord pour la réalisation de ce projet et pour ses encouragements continus.

M. Pinghouinde Michel NIKIEMA de l'agence Nationale de la Météorologie, de m'avoir envoyé les données climatiques nécessaires pour la réalisation de mes travaux et à Mme Christine RICHARD pour son soutient durant la réalisation de ce projet.

Tout le corps enseignant de l'ÉTS et de l'UFR / SEA, qui ont permis de près ou de loin à l'aboutissement de ce projet. Tous mes grands frères, tantes, tontons et collèges pour leurs soutiens.

Modélisation hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment avec le matériau chanvre

Aguérata KABORE

RÉSUMÉ

La construction de bâtiment en béton de chanvre est une technique ancienne qui connait un nouvel essor aujourd'hui en France grâce à sa performance énergétique dans tout le cycle de vie d'un bâtiment. Ce point fort permet de considérer le béton de chanvre comme un matériau prometteur pour la construction durable à l'avenir. Ce béton est un matériau de construction renouvelable et écologique relativement récent au Canada et inutilisé en Afrique de l'ouest, plus précisément au Burkina Faso. Cependant, le béton de chanvre s'inscrit dans la tendance actuelle de l'utilisation des matériaux biosourcés. Il a une empreinte écologique favorable, contribuant à la réduction des émissions de GES. De ce fait, l'intégration de ce béton dans la construction canadienne et burkinabé est primordiale et bénéfique du point de vue développement durable. Ce travail consiste à trouver une alternative de construction traditionnelle par l'intégration de matériaux nouveaux et surtout avec une empreinte écologique pour l'amélioration de la performance hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment. D'où notre intérêt se penche à l'étude des performances du béton de chanvre en tant que matériau et surtout son intégration et son comportement hygrothermique dans le système d'enveloppe étudiée. Les résultats de la simulation avec le logiciel WUFI Pro 6.2 des murs dans le cadre d'une étude pour la ville de Montréal ont révélé que le béton de chanvre présente une excellente qualité de régulation de la chaleur et de l'humidité, donc aucun problème de dégradation causé par l'humidité n'est détecté pour des infiltrations d'eau de moins de $5m^3/m^2h$. Toute fois pour un taux de pluie battante de plus de 5% pendant toute l'année, que le mur soit en laine de verre ou béton de chanvre, son coté extérieur ne supporte pas. Pour la ville de Dori, les résultats de la simulation avec le logiciel WUFI Pro 6.2 des murs de l'étude ont révélé que le béton de chanvre présente une excellente qualité de régulation de la chaleur quel que soit la quantité de fraction de rayonnement solaire incident envoyée à sa surface extérieure en plus de la température extérieure. En effet, les températures de la surface intérieure des murs en béton de chanvre tournent autour de 21,6 ℃ à 24,5 ℃ comparativement aux murs en brique de terre comprimée et en bloc de ciment, dont la température intérieure est entre 21 ℃ et 27 ℃ respectivement 19 ℃ et 29 ℃. En conclusion, le béton de chanvre semble être un excellent matériau à intégrer dans la construction canadienne et burkinabé tout en respectant les codes de construction.

Mots-clés : Chanvre, matériaux biosourcés, écologiques, comportement hygrothermique, performance thermique, code de construction

Hygrothermal modeling of the building envelope with hemp material

Aguérata KABORE

ABSTRACT

The hemp concrete in building is an old technique that is experiencing a new boom today in France thanks to its energy performance throughout the life cycle of a building (phase of construction, occupation and demolition). This strong point makes hemp concrete a promising material for sustainable building in the future. This concrete is a relatively new renewable and green building material in Canada and unused in West Africa, specifically in Burkina Faso. However, hemp concrete is part of the current trend in the use of biobased materials. Indeed, it is a filling and non-carrier material obtained by mixing hemp, lime and water. It has a favorable ecological footprint, contributing to the reduction of GHG emissions. As a result, the integration of this concrete in Canadian and Burkinabe building is essential and beneficial from a sustainable development point of view. This work involves finding a traditional construction alternative by integrating new materials that has an ecological footprint to improve the hygrothermal performance of the building envelope. Hence our interest to study the performance of hemp concrete as a material and its integration in the building envelope. The results of the simulation with the WUFI Pro 6.2 software for study conducted on walls the city of Montreal revealed that hemp concrete has excellent heat and moisture regulation quality, so no degradation problems caused humidity is observed after the simulation for water infiltration of less than $5m^3$ / m^2h. However, for a driving rain rate of more than 5%, whether the wall is made of glass wool or hemp concrete, its external side does not support this quantity for all year long. For the city of Dori, the results of the simulation with the WUFI Pro 6.2 software of the studied walls revealed that the hemp concrete has an excellent quality of regulation of the heat whatever the fraction of solar radiation incident sent to its outer surface in addition to the outside temperature. In fact, the interior surface temperatures of hemp concrete walls are around 21.6 °C to 24.5 °C, making the habitat pleasant to live compared to compressed earth brick and cement block walls, of which the indoor temperature is between 21 °C and 27 °C respectively 19 °C and 29 °C. In conclusion, hemp concrete seems to be an excellent material to integrate into Canadian and Burkinabe building while respecting building codes.

Keywords: Hemp, biosourced materials, ecological, hygrothermal behavior, thermal performance, building code

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE 11
1.1 Interaction du bâtiment et de son environnement 11
1.1.1 Transferts de chaleur entre l'enveloppe du bâtiment et le milieu extérieur 12
1.1.2 Influence du climat extérieur sur l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment..... 14
1.1.3 Rôle de l'enveloppe face au climat extérieur..... 15
1.2 Demande d'énergie et émissions de gaz à effet de serre 17
1.3 Bois dans la construction 21
1.3.1 Avantages de l'utilisation du bois dans la construction..... 24
1.3.2 Gestion de l'humidité dans les bâtiments à ossature de bois 26
1.3.3 Exemple des systèmes de mur à ossature de bois 29
1.4 Chanvre dans la construction 31
1.4.1 Composition de la plante de chanvre et avantages liées à sa culture..... 32
1.4.2 Liant 35
1.4.2.1 La chaux..... 36
1.4.3 Béton de chanvre dans la construction..... 37
1.5 Utilité des outils de simulation 49

CHAPITRE 2 CODES DES BÂTIMENTS ET CONSTRUCTION AU CANADA ET AU BURKINA FASO 53
2.1 Codes et construction des bâtiments au Canada et au Québec 53
2.1.1 Codes de constructions 53
2.1.2 Bâtiments résidentiels 55
2.1.3 Étanchéité à l'air 60
2.2 Construction au Burkina Faso.....63
2.2.1 Condition climatique..... 63
2.2.2 Matériaux majoritaires utilisés dans la construction..... 64
2.2.3 Matériaux disponibles nécessaires pour la construction au Burkina Faso 65

CHAPITRE 3 MODÉLISATION DE L'ENVELOPPE DE BÂTIMENT ET CHOIX DE L'OUTIL DE SIMULATION.....71
3.1 Transfert thermique et massique à travers une enveloppe 71
3.1.1 Définition des coefficients liés à l'équation de conservation de chaleur et d'humidité..... 73
3.2 Propriétés importantes pour l'étude hygrothermique des matériaux 74
3.2.1 Densité à l'état sec du matériau 74
3.2.2 Chaleur spécifique 74

3.2.3 Inertie thermique ou masse thermique 75
3.2.4 Conductivité thermique λ 76
3.2.5 Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur μ 77
3.2.6 Teneur en eau 77
3.2.7 Humidité relative et coefficient d'absorption du liquide 81
3.3 Modélisation numérique 82
3.3.1 Présentation du logiciel 82
3.3.2 Norme utilisée pour la simulation présente dans WUFI Pro 6.2 84
3.3.3 Facteurs pertinents 85

CHAPITRE 4 VÉRIFICATION DU LOGICIEL WUFI Pro 6.2 87
4.1 Hypothèse pour la simulation Dahkal, 2017 et Lamalle, 2016 87
4.2 Condition aux limites 88
4.3 Configuration d'assemblage de mur pour la vérification 89
4.3.1 Pour la ville de Toronto défini par Dahkal 89
4.3.2 Pour la ville de Liége défini par Lamalle 91
4.3.3 Configuration avec WUFI Pro 93
4.4 Vérification des résultats WUFI Pro 6.2 à ceux de Dahkal, 2017 et Lamalle, 2016 95
4.4.1 Vérification des résultats WUFI Pro 6.2 à ceux de Dahkal, 2017 95
4.4.2 Vérification des résultats WUFI Pro 6.2 à ceux de Lamalle, 2016 102

CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE ET SIMULATION NUMÉRIQUE DES CAS D'ÉTUDE 109
5.1 Méthodologie 109
5.1.1 Objectif de l'étude et intégration du béton de chanvre dans l'enveloppe du bâtiment 116
5.1.2 Méthode de formulation du béton de chanvre et de sa composition 116
5.1.2.1 Béton de chanvre formulé par Collet F., 2004 116
5.1.2.2 Béton de chanvre formulé par Samri Driss, 2008 117
5.1.2.3 Béton de chanvre formulé par Dhakal, 2017 119
5.1.3 Propriétés hygrothermiques des bétons de chanvre de (Collet, 2004), de (Samri, 2008) et (Dhakal, 2017) 119
5.2 Simulations 125
5.2.1 Limitations 125
5.2.2 Hypothèses de base pour les parois d'études 125
5.2.3 Condition aux limites 125
5.2.4 Composition des murs d'étude 127

CHAPITRE 6 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 133
6.1 Résultats 133
6.1.1 Résultats de la simulation des murs de la ville de Montréal 136
6.1.1.1 Teneur en eau totale, teneur en eau et l'humidité relative des matériaux des murs pour chaque scénario 136
6.1.1.2 Évolution de la température à l'extérieur du polystyrène et dans l'isolant et de la surface intérieure du mur 146
6.1.2 Résultats de la simulation des murs de la ville de Dori 149

6.2 Discussions 153
6.2.1 Discussion des résultats des murs simulés par les données de la ville de Montréal 153
6.2.2 Discussion des résultats des murs simulés par les données de la ville de Dori 159

CONCLUSION.....167

RECOMMANDATIONS 169

ANNEXE I DÉFINITION DES NORMES PRÉSENTENT DANS LE LOGICIEL WUFI Pro 6.2 171

ANNEXE II GUIDE D'UTILISATION DU LOGICIEL WUFI Pro 6.2 ET RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES SIMULATION (MODÉLISATION WUFI PRO 6.2).....173

II.1. WUFI Pro 6.2_encodage cas standard 173

II.2. WUFI Pro 6.2 _Matériaux.....181
II.3. WUFI Pro 6.2_Résultats des murs de Montréal et des murs de Dori 190

BIBLIOGRAPHIE.....205

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Récapitulation des résultats de la figure 1.6 19

Tableau 1.2 Énergie grise et émissions de dioxyde de carbone de différents matériaux de la construction 24

Tableau 1.3 Caractéristique physique des matériaux à base de bois. 28

Tableau 1.4 Compositions massiques et volumiques des liants PF70 et Tradichanvre 35

Tableau 1.5 Exemple de dosage massique en fonction de l'utilisation [Evrard, 08]....38

Tableau 1.6 Porosité du mortier de chanvre 39

Tableau 2.1 Réglementation énergétique pour les nouveaux bâtiments (remplace le REENBQ) prévue pour 2017 55

Tableau 2.2 Valeurs RSI et R exigées pour les nouveaux bâtiments, des maisons Novoclimat et la nouvelle réglementation (partie 11) [1] et la transmission thermique 57

Tableau 2.3 Valeurs RSI et R exigés pour la nouvelle réglementation (partie 11) [2] 58

Tableau 2.4 Tableau 9.25.1.2 faisant partie intégrante de l'article 9.25.1.2.....59

Tableau 2.5 Degrés-jours sous 18°C de quelques villes de Canada.....59

Tableau 3.1 Définition de chaque terme des équations (3-1) et (3-2) 72

Tableau 3.2 Définition des coefficients des équations (3-1) et (3-2).....73

Tableau 3.3 Expressions de la teneur en eau 78

Tableau 3.4 Expressions utilisées par certains auteurs pour la détermination de la pression saturante 80

Tableau 3.5 Expressions nécessaires pour la détermination des coefficients de diffusion 81

Tableau 4.1 Données d'entrée du béton de chanvre 91

Tableau 4.2 Données d'entrées des matériaux.....92

Tableau 4.3 Intégrale de flux par rapport au temps : mur 1.....98

Tableau 4.4 Résumé de la teneur en eau totale : mur 1 98

Tableau 5.1 Liste des scénarios de simulation pour la ville de Montréal.....111

Tableau 5.2 Liste des scénarios de simulation pour la ville de Dori 112

Tableau 5.3 Composition du béton de chanvre A et B 117

Tableau 5.4 Composition de HLC1 et HLC2 118

Tableau 5.5 Composition des bétons Mix1, Mix2 et Mix3 119

Tableau 5.6 Valeur de teneur en eau à 80%HR, saturation en eau libre et maximale calculée à partir des données de (Collet, 2004) et de (Samri, 2008).....120

Tableau 5.7 Valeur de l'humidité typique de construction des bétons de chanvre calculé à partir des données de (Collet, 2004), de (Samri, 2008) et de (Dhakal, 2017).....120

Tableau 5.8 Résumé des données des bétons de chanvre utilisés dans l'étude 122

Tableau 5.9 Tableau de référence résumant les propriétés des bétons de chanvre.....122

Tableau 5.10 Propriétés hygrothermiques des bétons de chanvre utilisés pour l'étude établie en utilisant les données du béton de chanvre de (Samri, 2008) et (Dhakal, 2017) 124

Tableau 5.11 Composition de chaque enveloppe de bâtiment étudiées dans WUFI Pro 6.2 pour la ville de Montréal.....128

Tableau 5.12 Propriétés des composants de l'enveloppe pour la ville de Montréal.....129

Tableau 5.13 Résumé des valeurs de la résistance thermique (RSI/R) pour chaque mur et isolant, de la transmission thermique U et de l'épaisseur totale de chaque cas obtenu par le logiciel WUFI Pro 6.2.....130

Tableau 5.14 Composition de chaque enveloppe de bâtiment étudiée dans WUFI Pro 6.2 pour la ville de Dori au Burkina Faso 131

Tableau 5.15 Propriétés des composants de l'enveloppe pour la ville de Dori.....131

Tableau 6.1 Récapitulation des résultats de la variation de température des murs 154

Tableau 6.2 Récapitulation des résultats de l'humidité relative des murs pour les deux taux d'infiltration d'eau 154

Tableau 6.3 Récapitulation des résultats de l'humidité relative des murs pour les deux fractions de pluie battante 155

Tableau 6.4 Récapitulation de la variation de la température dans les matériaux 161

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 0.1 Variation de la température journalière de la ville de Dori pour l'année 2016 6

Figure 0.2 Variation de la température de la ville de Dori pour le mois de mai 2016 7

Figure 0.3 Variation de la température de la ville de Dori pour une journée typique (24 h) du mois de mai 2016 7

Figure 0.4 Synthèse du travail 10

Figure 1.1 Modes de transfert de chaleur dans un bâtiment 13

Figure 1.2 Sollicitations extérieures que subit l'enveloppe d'un bâtiment 14

Figure 1.3 Migration de la vapeur d'eau par convection et par diffusion 15

Figure 1.4 Demande d'énergie des bâtiments résidentiels au Canada 2013 17

Figure 1.5 Demande d'énergie des bâtiments résidentiels au Québec 18

Figure 1.6 Évolution du réchauffement global, selon différents scénarios d'émission de GES 19

Figure 1.7 Émissions de GES du secteur résidentiel, par scénario – Canada 20

Figure 1.8 Différents matériaux issus de bois 22

Figure 1.9 Évaluation du cycle de vie de trois systèmes de construction 25

Figure 1.10 Construction en bois typique au Canada 26

Figure 1.11 Valeur tampon d'humidité 28

Figure 1.12 Composition des murs à ossature de bois 29

Figure 1.13 Exemple de murs à ossature de bois 30

Figure 1.14 Plantes de chanvre (a) et la composition de la tige de chanvre (b) 32

Figure 1.15 Tige de chanvre (a), Micrographie d'une coupe d'une tige de chanvre (b) 33

Figure 1.16 Vue au microscope électrique à balayage MEB de la porosité de la tige du chanvre 34

Figure 1.17 Chènevotte de finition (a), chènevotte fibrée pour dalle (b) et chènevotte standard pour isolation (c) 34

Figure 1.18 Différents matériaux issus du chanvre 35

Figure 1.19 Composition du béton de chanvre (a) et schématisation de la matrice en fonction de l'utilisation [Evrard, 08] (b) 37

Figure 1.20 Trois classes de pores au sein du béton de chanvre [Col, 2004].....38

Figure 1.21 Valeur d'énergie grise pour les matériaux couramment utilisés dans le bâtiment 39

Figure 1.22 Masse volumique initiale et finale du béton de chanvre pour différentes formulations 40

Figure 1.23 Isotherme d'adsorption-désorption expérimentale et analytique du béton de chanvre 42

Figure 1.24 Isotherme d'adsorption-désorption des particules de chanvre à T = 20°C 43

Figure 1.25 Isotherme d'adsorption-désorption du liant PF70 et chènevotte : source (GARNIER, 2000).....43

Figure 1.26 Émission et captation de CO_2 en Teq CO_2.....45

Figure 1.27 Comparaison de la température intérieure de deux bâtiments « béton de chanvre noyé » et « ossature de bois classique » en fonction de la température extérieure en été pour une journée typique (24 h).....46

Figure 1.28 Mur en brique de chanvre (a) et mortier de chanvre projeté (b).....47

Figure 1.29 Béton de chanvre en contacte d'un bruleur.....48

Figure 2.1 Valeurs de la résistance thermique totale de chaque partie du bâtiment exigé par le code de construction du Québec.....56

Figure 2.2 Étapes à suivre pour un bâtiment plus étanche à l'air.....60

Figure 2.3 Importance de l'étanchéité à l'air 61

Figure 2.4 Technique de réalisation de l'étanchéité à l'air 62

Figure 2.5 Variation des températures extérieures des années 2014-2016 de la ville de Dori.....63

Figure 2.6 Histogramme des températures moyennes mensuels.....64

Figure 2.7 Zones et pôles d'utilisation des matériaux et techniques appropriés, Observations sur le terrain. 66

Figure 2.8 Différents types de construction au Burkina Faso 68

Figure 3.1 Température intérieure pour une paroi à faible et à forte inertie thermique 75

Figure 3.2 Interface de WUFI Pro 6.2.....83

Figure 3.3 Espace de travail 83

Figure 3.4 Organigramme de calcul avec la norme ANSI/ASHRAE 160 85

Figure 3.5 Modèle globale pour la méthode de calcul numérique par WUFI Pro 6.2.....86

Figure 4.1 Assemblage de mur de simulation pour la vérification (WUFI Pro 6.2) et Dahkal, 2017.....90

Figure 4.2 Assemblage de mur de simulation pour Lamalle et WUFI Pro 6.2.....92

Figure 4.3 Assemblage du mur 2, WUFI Pro 6.2 (a) et Dahkal, 2017 (b) 93

Figure 4.4 Cas 1, WUFI Pro 6.2 (a) et Lamalle, 2016 (b).....94

Figure 4.5 Animation pour le mur 1, a) WUFI Pro 6.2 et b) WUFI Pro 5.1 pour la ville de Toronto.....96

Figure 4.6 Animation pour le mur 2, a) WUFI Pro 6.2 et b) WUFI Pro 5.1 pour la ville de Toronto.....97

Figure 4.7 Teneur en eau (kg/m^2) du mur 1, Dahkal ,2017.....98

Figure 4.8 Teneur en eau (kg/m^2) du mur 1, WUFI Pro 6.2 [Aguérata Kaboré] 99

Figure 4.9 Teneur en eau des enduits de chaux du mur 1, Dahkal, 2017.....99

Figure 4.10 Teneur en eau des enduits de chaux du mur 1, WUFI Pro 6.2 [Aguérata Kaboré] 100

Figure 4.11 Teneur en eau du béton de chanvre du mur 1, Dhakal, 2017.....100

Figure 4.12 Teneur en eau du béton de chanvre du mur 1, WUFI Pro 6.2 [Aguérata Kaboré] 101

Figure 4.13 Teneur en eau totale (kg/m^2) du mur 2, Dahkal, 2017.....101

Figure 4.14 Teneur en eau totale (kg/m^2) du mur 2, WUFI Pro 6.2 [Aguérata Kaboré] 102

Figure 4.15 Animation pour le cas 1, Liège pour le 1/10/2019.....103

Figure 4.16 Teneur en eau totale du cas 1, Lamalle, 2016.....104

Figure 4.17 Teneur en eau totale du cas 1, WUFI Pro 6.2 104

Figure 4.18 Teneur en eau du béton de bois côté gauche, cas 1, Lamalle, 2016 105

Figure 4.19 Teneur en eau du béton de bois côté gauche, cas 1, WUFI Pro 6.2.....105

Figure 4.20 Teneur en eau du béton de bois côté droit (vers l'intérieur), cas 1, Lamalle, 2016 106

Figure 4.21 Teneur en eau du béton de bois côté droit (vers l'intérieur), cas 1, WUFI Pro 6.2.....106

Figure 4.22 Teneur en eau du béton de bois côté extérieur, cas 4, Lamalle, 2016 107

Figure 4.23 Teneur en eau du béton de bois côté extérieur, cas 4, WUFI Pro 6.2.....107

Figure 5.1 Structure d'enveloppe 110

Figure 5.2 Matrice de composition d'enveloppe pour l'étude à Dori au Burkina Faso 113

Figure 5.3 Étape de simulation pour la ville de Dori 113

Figure 5.4 Matrice de composition d'enveloppe de l'étude pour la ville de Montréal au Canada 114

Figure 5.5 Étape de simulation pour la ville de Montréal.....114

Figure 5.6 Exemple de matériaux cités dans la conception des murs d'études.....115

Figure 5.7 Séchage à l'étuve 118

Figure 5.8 Évolution de la teneur en eau volumique en fonction de la masse des bétons de chanvre.....121

Figure 6.1 Configuration du mur et maillage du cas standard dans WUFI Pro 6.2 pour la ville de Montréal 134

Figure 6.2 Animation du cas standard 1 pour le taux d'infiltration d'eau de $1m^3/m^2h$, ville de Montréal 134

Figure 6.3 Configuration du mur et maillage du cas 1 dans WUFI Pro 6.2 pour la ville de Dori 135

Figure 6.4 Animation du cas 1pour le taux d'infiltration d'eau de $1m^3/m^2h$, la ville de Dori 135

Figure 6.5 Teneur en eau totale des murs cas standard, mur 1 et mur 2 à Montréal pour un taux d'infiltration d'eau de 1 m^3/m^2 h 137

Figure 6.6 Teneur en eau totale des murs cas standard, mur 1 et mur 2 pour un taux d'infiltration d'eau de 5 m^3/m^2 h 137

Figure 6.7 Courbes teneur en eau totale du mur en laine de verre 138

Figure 6.8 Courbes de teneur en eau totale du mur en béton de chanvre HLC2 139

Figure 6.9 Teneur en eau totale des murs en béton de chanvre Mix 3 139

Figure 6.10 Teneur en eau de l'isolant en laine de verre, du béton de chanvre HLC2 et du béton de chanvre Mix3 pour le taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h 140

Figure 6.11 Teneur en eau de l'isolant en laine de verre, du béton de chanvre HLC2 et du béton de chanvre Mix3 pour le taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h 141

Figure 6.12 Teneur en eau de l'isolant en polystyrène expansé 141

Figure 6.13 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: cas standard 142

Figure 6.14 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: cas standard 143

Figure 6.15 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: cas 1 143

Figure 6.16 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: cas 1 144

Figure 6.17 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: cas 2 144

Figure 6.18 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: cas 2 145

Figure 6.19 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: cas standard.....146

Figure 6.20 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: cas standard.....147

Figure 6.21 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: cas 1 147

Figure 6.22 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: cas 1 148

Figure 6.23 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: cas 2 148

Figure 6.24 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: cas 2 149

Figure 6.25 Évolution de la température dans le bloc de ciment pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 % 150

Figure 6.26 Évolution de la température dans le bloc de ciment pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 % 151

Figure 6.27 Évolution de la température dans un mur en brique de terre comprimée pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 % 151

Figure 6.28 Évolution de la température dans un mur en brique de terre comprimée pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 %152

Figure 6.29 Évolution de la température dans un mur en béton de chanvre pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 %.....152

Figure 6.30 Évolution de la température dans un mur en béton de chanvre pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 % 153

Figure 6.31 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 1 % : cas standard.....156

Figure 6.32 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 5 % : cas standard....156

Figure 6.33 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 1 % : cas 1 157

Figure 6.34 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 5 % : cas 1 157

Figure 6.35 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 1 % : cas 2 158

Figure 6.36 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 5 % : cas 2 158

Figure 6.37 Atténuation de la température dans les murs pour une fraction de rayonnement solaire de 1 %....160

Figure 6.38 Température de la surface intérieure des matériaux pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 % 161

Figure 6.39 Température de la surface intérieure des matériaux pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 % 162

Figure 6.40 Température de la surface intérieure des murs pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 % 162

Figure 6.41 Température de la surface intérieure des murs pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 % 163

Figure 6.42 Température de la surface intérieure du mur en béton de chanvre....164

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Certaines notations ne figurent pas dans la liste ci-dessous du fait qu'elles sont définies directement dans le texte.

ACH	Changement d'Air par heure
ADEME	Agence de l'Environnement et de Maitrise de l'Énergie
ASHRAE	American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Material
ARPE	Association Régionale pour la Promotion de l'Éco-construction
BTC	Bloc de Terre Comprimée
BLT	Bloc de Latérite Taillé
CSB	Construction Sans Bois
CCQ	Code de Construction du Québec
CNRC	Conseil National de Recherche du Canada
COP	Conférence Internationale sur le Climat
CIMAF	Ciment de l'Afrique
CIMAFASO	Ciment du Burkina Faso
CVC	Système de Chauffage, Ventilation et Climatisation
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
EPS	Polystyrène Expansé
GES	Emission des Gaz à Effet de Serre
IBP	Institut Fraunhofer pour la Physique du Bâtiment
ILNAS	Institut Luxembourgeois de Normalisation d'Accréditation et de Sécurité
INSD	Institut National de la Statistique et de la Démographie

IRIS	Institut de Relation Internationale et Stratégique
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
MBV	Valeur Tampon d'Humidité
MEB	Microscopie Electronique à Balayage
PNACC_BF	Plan National d'Adaptation au Changement Climatique au Burkina Faso
PME	Petites et Moyennes Entreprises
RCP	Représentative Concentration Pathway
RNCan	Ressources Naturelle Canadienne
REENB	Règlementation Énergétique pour les Nouveaux Bâtiments
SCHL	Société Canadienne d'Hypothèque et Logement
VN	Voûte Nubienne
WUFI	Wärme Und Feuchte Instationär (Transitoires de Chaleur et d'Humidité)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Unité de l'aire (m^2)
a	Diffusivité thermique (m^2/s)
C	Chaleur massique (J/ [kg. k])
d	Distance (m)
d_p	Diamètre des pores (m)
D_φ	Coefficient de conduction (g/[m.h.mmHg])
D_w	Gradient de la teneur en eau (m^2/s)
D_v	Coefficient de conduction liquide (kg/m s)
D_T	Gradient de température (K/W)
D_o	Coefficient de diffusion de vapeur de l'air libre (m^2/s)
E	Effusivité thermique ($J/m^2\ Ks^{1/2}$)
e	Épaisseur (m)
g	Champ de pesanteur (N/kg)
g_v	Densité de flux de diffusion de vapeur (kg/m^2s)
H	Enthalpie Totale (J/m^3)
HR	Humidité Relative (%)
U	Transmission thermique (W/m^2K)
K	Conductivité hydraulique (kg/Pa.m.s)
K_l	Perméabilité liquide (s)
K_n	Nombre de Knudsen (-)
Lv	Chaleur latente de vaporisation (J/kg)
L_{pm}	Libre parcours moyen (m)
M_v	Masse molaire de la vapeur d'eau (g/mol)
m	Masse (kg)
m_s	Masse de la partie solide (kg)
m_{sec}	Masse du matériau à l'état sec (kg)
m_e	Masse d'eau dans le matériau (kg)
m_h	Masse du matériau humide (kg)
$\dot{m}_a$	Débit massique de l'air (kg/s)
$\dot{m}_v$	Débit massique de la vapeur (kg/s)
n_t	Porosité totale (m^3/m^3)
n_f	Porosité fermée (m^3/m^3)
n_o	Porosité ouverte (m^3/m^3)
$n_{o,i}$	Porosité ouverte interconnectée (m^3/m^3)
$n_{o,ni}$	Porosité ouverte non interconnectée (m^3/m^3)
P	Pression (Pa)
P_a, P_o	Pression atmosphérique (Pa)
P_c	Pression capillaire (Pa)
P_l	Pression liquide (Pa)
Psat	Pression de vapeur saturante (Pa)
P_v	Pression de vapeur d'eau (Pa)
Q	Quantité de chaleur (J)

q_v	Flux de la vapeur d'eau (kg/s)
r	Rayon (m)
R	Constante des gaz parfait (J/ [mol.K])
R	Résistance thermique (m^2K/W)
RSI	Résistance thermique effective (m^2K/W)
Sd	Épaisseur équivalente de diffusion (m)
S	Taux de saturation (-)
t	Temps (s ou en h)
T	Température (°C)
V	Volume (m^3)
V_{ap}	Volume apparent (m^3)
V_f	Volume fermé (m^3)
V_o	Volume ouvert (m^3)
$V_{o,i}$	Volume ouvert interconnecté (m^3)
$V_{o,ni}$	Volume ouvert non interconnecté (m^3)
V_{sec}	Volume du matériau à l'état sec (m^3)
W	Teneur en eau (kg/m^3)
W_a	Teneur en eau de l'air (kg/m^3)
W_p	Perméance à la vapeur d'eau (g/ [m^2 h mmHg])
W_v	Teneur en eau de la vapeur (kg/m^3)
z	Hauteur (m)
ΔT	Variation de la température (°C)

Unité de masse

$MteqCO_2$	Millions de tonnes équivalentes dioxyde de carbone
Ha	Hectare
$kgeqCO_2$	Kilogramme équivalent dioxyde de carbone
Teq	Tonne équivalente

Lettres grecques

λ	Conductivité thermique	(W/m K)
δ_p	Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau	(g/m h mmHg)
δ_{air}	Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air	(g/m h mmHg)
ρ_{ap}	Masse volumique apparente	(kg/m^3)
ρ_s	Masse volumique du matériau solide	(kg/m^3)
ρ_{sec}	Masse volumique du matériau à l'état sec	(kg/m^3)
ρ_l	Masse volumique de l'eau liquide	(kg/m^3)
ρ_v	Masse volumique de la vapeur d'eau	(kg/m^3)

σ	Tension superficielle	($m^2kg/$ ($K.s^2.mol$)
∇	Gradient	(-)
θ	Angle de mouillage	(-)
φ	Humidité relative	(-)
μ	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	(-)
$\mathcal{N}$	Nombre de Reynold	(-)
ε'	Taux de changement de phase	(-)

INTRODUCTION

La nécessité d'améliorer l'ensemble des composants du bâtiment et de réduire sa consommation énergétique est de plus en plus cruciale. Au Canada et comme partout dans le monde, les émissions de gaz à effet de serre (GES) produites par les activités humaines sont attribuées aux activités de la consommation d'énergie. Au niveau mondial, le secteur du bâtiment représente à lui seul plus de 32 % de la consommation énergétique finale et contribue à hauteur d'un tiers aux émissions de gaz à effet de serre (Thibault & El Andaloussi, 2011). En Amérique du Nord, les bâtiments représentent plus de 31 % de la consommation énergétique totale, 76 % de l'énergie produite par les centrales sont destinées à l'alimentation des bâtiments (Commission de Coopération Environnementale, 2008). Cette demande énergétique contribue à plus de 35 % des émissions totales de CO_2 à l'échelle continentale (Commission de Coopération Environnementale, 2008). Le secteur du bâtiment est donc l'un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre en Amérique du Nord. En Afrique, 80 % de la consommation énergétique totale des pays est destiné aux bâtiments, dont plus des 67 %, à l'alimentation électrique (François, Radanne, & Diaz, 2012). Face à ces chiffres, les concepteurs et les chercheurs réfléchissent à des solutions en vue de réduire la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre liées aux bâtiments.

Depuis les années 1970, les questions environnementales, la pollution et la consommation d'énergie sont devenues de plus en plus importantes (Varenio, 2012). Les codes et réglementations thermiques qui en ont résulté ont conduit le secteur de la construction à se concentrer sur l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment. Les bâtiments nouvellement construits et rénovés sont de plus en plus étanches à l'air et très performants en ce qui concerne l'isolation thermique (Chamoin, 2013). Ce qui permet de réduire les besoins en chauffage en hiver, mais conduit à l'augmentation des besoins en refroidissement en été (Chamoin, 2013). Ce problème est lié aux matériaux utilisés pour la construction et à l'orientation du bâtiment par rapport au gain solaire en été.

Les matériaux d'isolation couramment utilisés dans la construction sont principalement réalisés avec des matériaux non renouvelables et souvent non adaptés au climat, ce qui engendre des problèmes de réutilisation en fin de cycle. De plus, la disponibilité limitée des ressources naturelles créée par l'urbanisation rapide entraîne une pénurie de matériaux de construction conventionnels (Désaunay Cécile & Jouvenel François, 2014). Aussi l'énergie consommée pour la production des matériaux de construction classiques pollue énormément l'air, l'eau et la terre (Désaunay Cécile & Jouvenel François, 2014). Pour répondre à la demande incessante des matériaux de construction à haute efficacité énergétique sans polluer l'environnement, il est nécessaire d'adopter des technologies rentables, respectueuses de l'environnement et de moderniser les techniques traditionnelles tout en utilisant des matériaux locaux disponibles sur notre milieu de vie.

L'application de l'agrodéchet pour les matériaux de construction durables ainsi que les matériaux biosourcés offre une solution et réduit l'utilisation des ressources naturelles ainsi que la consommation d'énergie. L'agrodéchet est un déchet issu de l'industrie du secteur agricole (déchets végétaux divers et biodégradables) et alimentaire. Les matériaux biosourcés sont des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale et animale. Les matériaux de constructions biosourcées et d'agrodéchet doivent toutefois respecter les conditions climatiques des régions dans lesquelles ils sont appliqués. En effet, l'objectif principal de l'utilisation des matériaux biosourcés est de contribuer à la limitation des matières premières d'origine fossile, limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) qui font partie d'une démarche de développement durable. De ce fait, il est donc nécessaire d'étudier leurs comportements hygrothermiques afin d'évaluer leurs capacités à donner du confort aux occupants du bâtiment tout en empêchant l'apparition des condensations et des moisissures dans l'enveloppe pour certains pays possédant des climats sévères.

Des outils de calcul ou simulation ont été développés pour résoudre les problèmes complexes de bâtiment. L'étude du comportement hygrothermique des matériaux de construction avant la conception des bâtiments fait partie des planifications et de la prédiction de la performance énergétique et hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment (Citherlet, Clarke, & Hand, 2001).

Ces outils de calcul ont pour rôle d'aider les chercheurs et les concepteurs à bien comprendre le comportement des composants du bâtiment face au climat extérieur qui varie d'année en année. En cet effet, les chercheurs se sont consacrés à la modélisation énergétique et à l'analyse du comportement hygrothermique des matériaux utilisés dans la construction ainsi que les systèmes d'enveloppe de bâtiment (Chang & Kim, 2015 ; Govaerts et al., 2018 ; Stahl et al., 2017). La consommation d'énergie dans les bâtiments représente environ le tiers des émissions de gaz à effet de serre du Canada, dont 15% sont attribués au secteur résidentiel (Ministry of Municipal Affaires and Housing, 2019). Améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment nécessite un niveau élevé d'isolation dans son enveloppe. Cependant, cela peut augmenter le risque de condensation et de croissance de moisissure dans les éléments critiques de l'enveloppe du bâtiment, et ainsi introduire des problèmes de santé et de durabilité non souhaités. Par exemple, des problèmes liés à l'humidité plus élevés peuvent survenir dans les systèmes de murs à ossature de bois hautement isolés par rapport aux systèmes de murs à ossature de bois traditionnels 2 x 6. En effet, la cavité murale plus profonde remplie d'isolant thermique entraînerait une température plus basse des matériaux à base de bois tels que l'OSB, ce qui pourrait augmenter le risque de condensation (Janssens A. and Hens H., 2003; Saber H. H. & Lacasse M. A. and Moore, 2017; TenWolde A. and Rose W. B., 1996) .Les fuites d'air à travers l'enveloppe du bâtiment réduisent la résistance thermique globale des composants du bâtiment, ce qui entraîne une baisse de la performance énergétique du bâtiment (Elmahdy, Maref, Saber, Swinton, & Glazer, 2010; Elmahdy, Maref, Swinton, Saber, & Glazer, 2009; Maref et al., 2011; Saber H.H., Maref W., Elmahdy A.H., & Swinton M.C., Glazer R., 2012; Saber, Maref, & Abdulghani, 2014; Saber, Maref, Elmahdy, & Swinton M.C., Glazer, 2010). De plus, les fuites d'air sont l'un des facteurs importants pouvant causer des problèmes liés à l'humidité tels que la condensation et la croissance de moisissures. Le comité de l'Association canadienne de normalisation responsable de la norme sur les systèmes de ventilation mécanique résidentiels (CAN / CSAF326-M91) a demandé au Conseil national de recherches du Canada (CNRC) d'étudier les effets de la surpression des maisons d'habitation sur la performance de l'humidité dans l'enveloppe des bâtiments. Une question connexe était de savoir si la limite de pressurisation supérieure à 10 Pa était acceptable pour les maisons situées partout au Canada. De nombreuses études de

simulation numérique ont été menées pour répondre à cette question dans différentes conditions climatiques (voir par exemple (Ojanen & Kumaran, 1996; Ojanen & Kumaran, 1992) . Pour les modes d'exfiltration et d'infiltration, le taux de fuite d'air à travers l'enveloppe du bâtiment dépend principalement des conditions intérieures et extérieures, des propriétés hygrothermiques des composants du bâtiment et des défauts (fissures, trous, etc.) de l'enveloppe du bâtiment. Les taux de fuite d'air dans des assemblages de murs en ossature de bois de 2 x 6 avec différents types d'isolation de cavité (fibre de verre, mousse à cellules ouvertes et mousse à cellules fermées) ont été mesurés expérimentalement à différentes valeurs de pression différentielle sur les murs (Elmahdy, Maref, Saber, Swinton, & Glazer, 2010; Elmahdy, Maref, Swinton, Saber, & Glazer, 2009; Maref et al., 2011; Saber H.H., Maref W., Elmahdy A.H., & Swinton M.C. and Glazer R., 2012; Saber, Maref, Elmahdy, & Swinton M.C. and Glazer, 2010) . Avec et sans fuite d'air, de nombreuses études de contrôle sur le terrain et numériques ont été menées pour étudier la résistance à l'humidité des systèmes de murs en ossature de bois avec différents niveaux d'isolation thermique intérieure et extérieure lorsque ces murs étaient soumis à des conditions climatiques différentes (Alev, Uus, Teder, Miljan, & Kalamees, 2014; Belleudy, Kayello, Woloszyn, & Ge, 2015; Derome, 2005; Desmarais, 2000; Karagiozis & Salonvaara, 1999; Parsons & Lieburn, 2013; H.H. Saber & Maref, 2019; Smegal, Lstiburek, Straube, & Grin, 2013). Par exemple, une étude sur le terrain a été menée pour étudier l'effet de l'ajout d'isolant extérieur sur la réponse hygrothermique des systèmes de murs à ossature de bois traditionnels de 2 x 6 (Maref, Armstrong, Rousseau, & Lei, 2010). Avec le mur à double montant, une étude de suivi a été menée pour étudier la performance en humidité de ces murs, soumis aux climats du nord-est (Ueno K., 2015). En outre, pour un mur à double montant ayant une valeur R nominale de R-40, (Arena , Owens, & Mantha, 2013) ont étudié les performances hygrothermiques de ce mur lorsqu'il a été soumis à la zone climatique 5a. Une étude en laboratoire a été menée pour caractériser les risques hygrothermiques liés à l'utilisation de systèmes pare-air extérieurs pour des murs légers hautement isolants (Langmans, Klein, & Roels, 2012) (Craven C. & Garber-Slaght R., 2014) ont étudié les conséquences pour le contrôle de l'humidité de la mise en conformité de l'enveloppe du bâtiment avec une isolation extérieure par temps froid. Pour les climats mixtes humides, (Glass, Kochkin, Drumheller, & Barta, 2015)ont étudié les

performances d'humidité d'assemblages de murs à ossature de bois classiques et à haut rendement énergétique. (Fox M., 2014; Ge, Straube, Wang, & Fox, 2019)ont mené des études sur le terrain et des études de simulation afin d'étudier la résistance à l'humidité des systèmes de murs à ossature de bois hautement isolés présentant des fuites d'air. En outre, avec des fuites d'air, des évaluations sur le terrain et des simulations numériques ont été menées pour étudier la réponse thermique et l'humidité ainsi que le risque de condensation et de développement de moisissures dans les systèmes de murs à ossature de bois hautement isolés (Lacasse et al., 2016; Saber, Lacasse, Ganapathy, Plescia, & Parekh, 2016) Sous différentes zones climatiques du Canada, (H.H. Saber & Maref, 2015)ont mené une étude numérique pour étudier le risque de condensation et de développement de moisissures dans les systèmes de murs en ossature de bois avec différentes résistances thermiques des isolants extérieurs.

Actuellement, parmi tous ces outils qu'on trouve sur le marché, l'outil de simulation WUFI est le plus apprécié et utilisé en Europe et en Amérique du Nord dans le domaine de l'étude du comportement hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment et de l'évaluation de sa performance énergétique. C'est un logiciel de simulation dynamique qui traite chaque élément de l'enveloppe du bâtiment et permet de faciliter les décisions de conception en matière de choix de matériaux et de scénario optimal pour un endroit donné. Cinq sous-programmes WUFI ont été développés par l'Institut Fraunhofer pour la physique du Bâtiment (IBP) à Holzkirchen en Allemagne. Chaque sous-programme WUFI a son objectif spécifique. Ces sous-programmes sont WUFI® 2D, WUFI® Pro, WUFI® Plus, WUFI® Passive et WUFI® Bio. Ils ont été utilisés par (Antretter, Klingenberg, & Pazold, 2013; Ferreira, de Freitas, & Ramos, 2014; Ge & Baba, 2015; Hartwig M Künzel, 1995; Sanders, Hermann, & Baker, 2014) et plusieurs d'autres chercheurs pour le traitement des problèmes liés à l'humidité comme la condensation interstitielle, la moisissure et aux transferts de chaleur et de masse dans les composants du bâtiment ainsi que pour l'évaluation de la performance énergétique dans les bâtiments.

LES OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Objectif principal

Le but principal de cette étude est de trouver une alternative de construction traditionnelle par l'intégration de matériaux nouveaux biosourcés pour l'amélioration de la performance hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment. D'où notre intérêt se penche à l'étude des performances du béton de chanvre en tant que matériau et surtout son intégration et son comportement hygrothermique dans le système d'enveloppe étudiée. L'étude vise à comprendre le comportement hygrothermique du béton de chanvre dans deux pays contrastés, le Canada et le Burkina Faso. Le Burkina Faso a un climat tropical qui présente des températures très élevées surtout la ville de Dori, situé dans le nord du Burkina Faso. La figure 1 met en évidence la variation de la température de la ville de Dori, au Burkina Faso. Ces températures sont très élevées toute l'année. Nous constatons à travers la figure 0.1, des températures qui s'élèvent jusqu'à 40°C. La majorité de la température de toute l'année est supérieure à 24°C sauf pour certains jours du mois de janvier et de février.

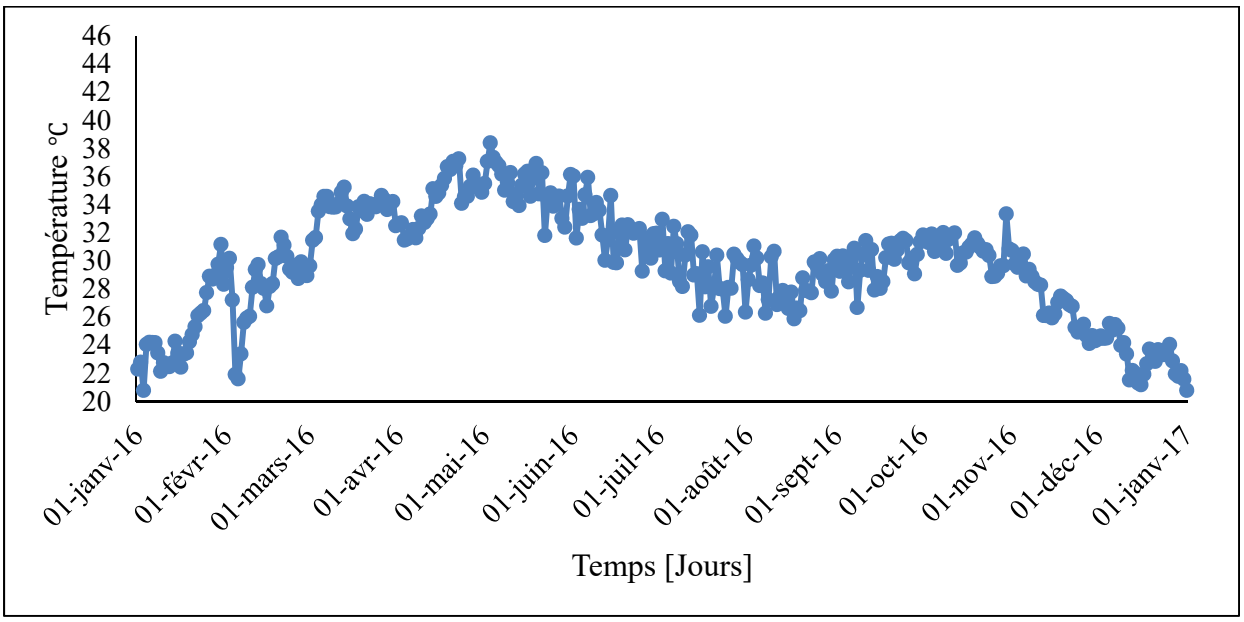


Figure 0.1 Variation de la température journalière de la ville de Dori pour l'année 2016

Pour mieux voir la variation de la température de la ville de Dori, nous présentons la figure 0.2 qui met en évidence la variation de la température du mois de mai 2016 en session d'été.

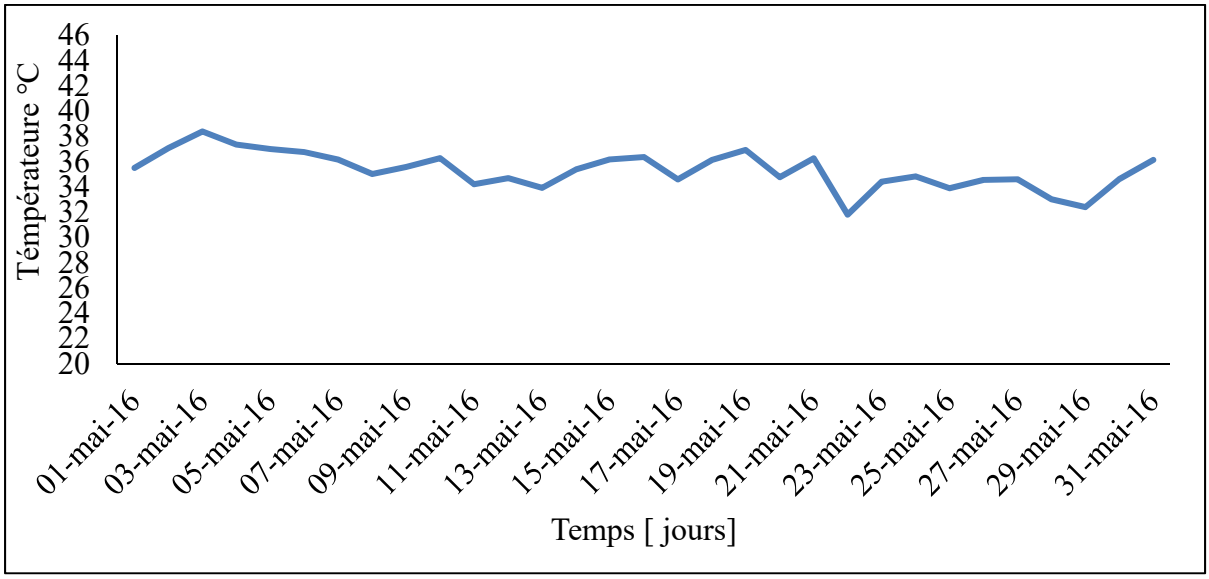


Figure 0.2 Variation de la température de la ville de Dori pour le mois de mai 2016

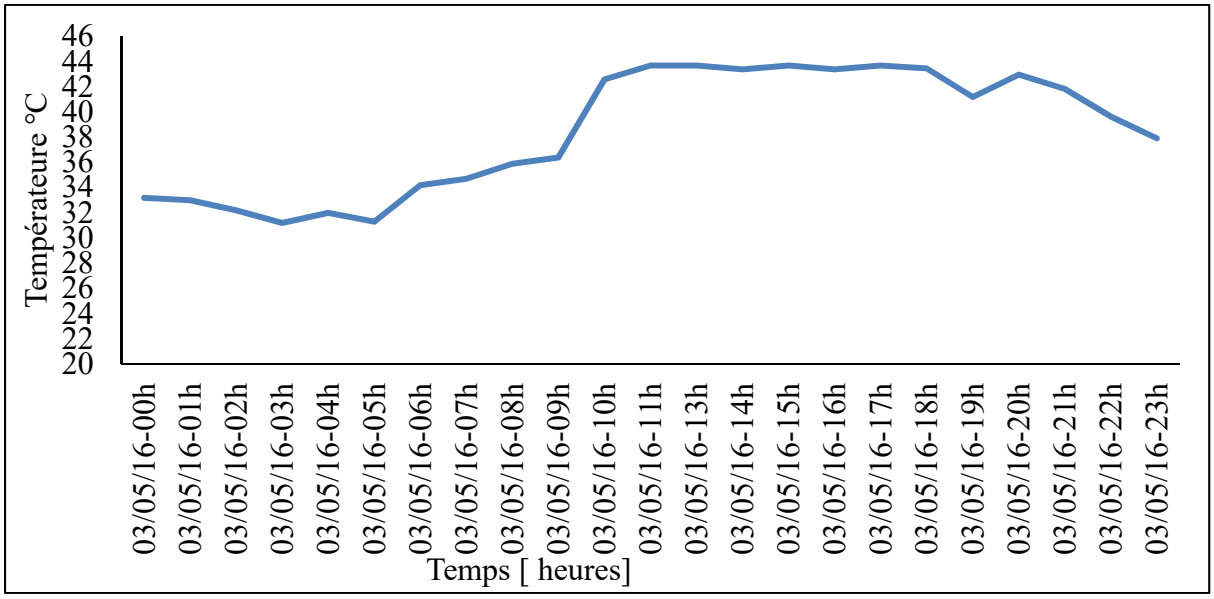


Figure 0.3 Variation de la température de la ville de Dori pour une journée typique (24 h) du mois de mai 2016

Pendant tout le mois de mai, la température extérieure est supérieure à 31℃, de même pour les mois de mars, avril, juin, juillet, aout ; septembre, octobre, novembre et la majorité des jours du mois de février et de janvier, lorsqu'on observe la figure 0.1 et figure 0.2, sauf le mois de décembre qui présente des températures moins de 25℃ (figure 0.1). Vu que la majorité de la température pendant l'année varie entre 24℃ et 43℃ (figure 0.3), les bâtiments sont en tout temps en mode de climatisation, d'où l'objet de cette étude enfin de trouver une alternative de système de mur pour améliorer l'enveloppe du bâtiment actuelle et ainsi réduire la consommation énergétique. En introduisant de nouveaux matériaux dans la construction Burkinabé qui est à la fois écologique et économique au niveau de la demande de l'énergie. Pour cela, nous voyons la possibilité d'intégrer le matériau de béton de chanvre dans l'enveloppe du bâtiment pour la ville de Dori. L'utilité de l'utilisation du béton de chanvre au Canada est plus basée sur sa capacité à stocker le carbone (Marc Chabot, 2010).

Les deux contextes ont été choisis parce que le Canada et l'Afrique sont tous deux producteurs de chanvre. L'Afrique est le premier producteur mondial de chanvre (ONUDC, 2007). L'Afrique à elle seule représentait 25% de la production mondiale de feuilles de cannabis et l'ensemble du continent américain représentait 46% de la production mondiale de cannabis en 2005 (ONUDC, 2007; Youssef, 2017). Cependant, l'utilisation du chanvre dans l'enveloppe du bâtiment est inexistante en Afrique et marginale au Canada. Si le comportement hygrothermique du béton de chanvre est satisfaisant, son utilisation serait prometteuse dans le contexte canadien ou burkinabé. De ce fait, il nous est important de faire une analyse hygrothermique et énergétique du béton de chanvre, un matériau qui emmagasine le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Ici, il est question d'évaluation de la performance énergétique du béton de chanvre en tant que matériau de construction pour la ville de Montréal au Canada et pour la ville de Dori, au Burkina Faso en utilisant le logiciel de simulation hygrothermique WUFI Pro 6.2. Ces deux villes ont un climat différent : un climat chaud et sec à Dori et humide et froid à Montréal. L'utilisation du béton de chanvre dans ces deux pays s'avère être avantageuse dans le cadre de l'efficacité énergétique dans les bâtiments.

Objectifs spécifiques

De façon plus spécifique, les objectifs de ce mémoire sont repartis comme suite :

1. Analyser la possibilité d'intégrer le béton de chanvre dans la structure du bâtiment dans la région de Montréal, au Canada en tenant compte des codes établis pour les bâtiments résidentiels ;
2. Analyser la possibilité d'intégrer le béton de chanvre dans la structure du bâtiment moderne dans la région de Dori au Burkina Faso ;
3. Analyser le comportement hygrothermique (température intérieure en été et en hiver, humidité relative, teneur en eau de l'ensemble de murs et pour chaque élément du mur) en utilisant l'outil de simulation WUFI Pro 6.2 ;
4. Analyser la consommation énergétique en chauffage et en refroidissement pour un bâtiment construit en béton de chanvre et en brique de terre cuite comprimée pour la région de Dori et en béton de chanvre pour la région de Montréal ;
5. Comparer les résultats des trois types d'enveloppes pour déterminer celui qui convient le mieux à la région de Dori. Comparer les résultats du mur en béton de chanvre à ceux de la construction standard pour la région de Montréal.

Le chapitre I de ce mémoire présente une revue bibliographique des recherches effectuées par différents chercheurs sur les matériaux qui contribuent à la réduction de l'émission du CO_2 plus précisément les matériaux en bois et en chanvre. Le chapitre II met l'accent sur les exigences des normes, codes et réglementations énergétiques établies pour les bâtiments résidentiels au Québec, Canada et la construction au Burkina Faso. Le chapitre III présente la modélisation numérique faisant l'objet de l'établissement d'équations du système d'étude. Le chapitre IV met l'accent sur la vérification du logiciel WUFI Pro 6.2 par différentes simulations. Le chapitre V présente la méthodologie et la simulation numérique des cas d'étude et le chapitre VI présente les résultats et les discussions. Une conclusion fait le bilan complet des différents résultats obtenus ainsi que les perspectives.

La contribution originale du rapport est de trouver une alternative de construction traditionnelle par l'intégration du béton de chanvre pour l'amélioration de la performance

hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment dans la construction à Montréal, au Canada et à Dori, au Burkina Faso.

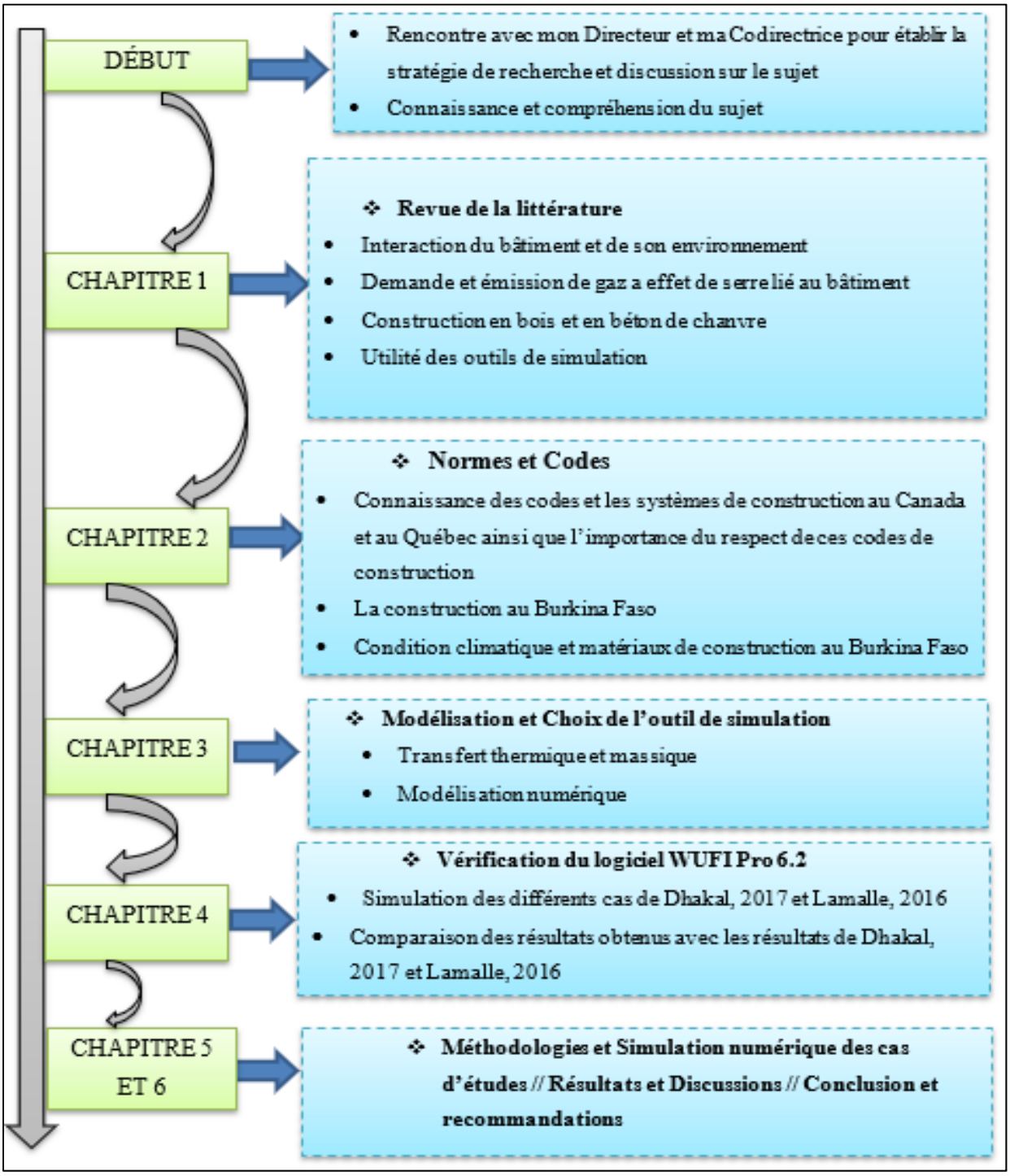


Figure 0.4 Synthèse du travail

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre explore les travaux antérieurs qui ont pour objectif d'étudier et d'analyser le comportement de l'enveloppe du bâtiment assujetti aux conditions climatiques extérieures. Il met l'accent sur le comportement hygrothermique, l'étanchéité, les propriétés hygrothermiques des composantes de l'enveloppe de bâtiments résidentiels construits en béton de chanvre et en bois. Ce chapitre présente aussi les travaux antérieurs qui analysent les outils et les méthodes de simulation actuellement utilisés pour les études dynamiques et hygrothermiques des composants du bâtiment y compris l'évaluation de la consommation énergétique. Ces analyses identifient les limites et l'évolution de ces outils et méthodes de simulation dans le temps.

1.1 Interaction du bâtiment et de son environnement

Le bâtiment est un objet très complexe soumis à des sollicitations externes et internes. Ces sollicitations sont la température extérieure, la pluie, la pression du sol, l'humidité, la chaleur, le vent, le bruit, la tornade, les tempêtes de glace, les échanges radiatifs solaires entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment et les charges internes (Hauglustaine & Simon, 2006 ; Kuznik, David, Johannes, & Roux, 2011). En effet, l'enveloppe du bâtiment joue le rôle de séparateur d'environnement entre l'intérieur et l'extérieur. Cette dernière doit être particulièrement capable de supporter ces sollicitations et répondre au confort intérieur sans influencer la demande énergétique du bâtiment. Ces sollicitations créant une interaction entre le bâtiment et son environnement causent une prise des décisions sur l'amélioration des composants de son enveloppe.

1.1.1 Transferts de chaleur entre l'enveloppe du bâtiment et le milieu extérieur

Les transferts de chaleur qui peuvent se produire à travers l'enveloppe d'un bâtiment se font selon trois modes : par convection, rayonnement et conduction. Ces modes de transferts sont en partie les sources de la consommation excessive du bâtiment si celui-ci est par exemple peu ou mal isolé. De ce fait, l'enveloppe doit pouvoir limiter les pertes de chaleur vers l'extérieur en hiver pour réduire le chauffage et protéger le climat intérieur contre la radiation solaire en été pour réduire la climatisation. Cette propriété d'atténuation et de régulation dépend des caractéristiques de transmission thermique de l'enveloppe du bâtiment (Hauglustaine, Simon, Baltus, & Liesse, 2006). Par définition, le coefficient de transmission thermique d'une enveloppe est la quantité de chaleur traversant l'enveloppe en régime permanent par unité de temps, de surface et de différence de température entre l'ambiant et les surfaces de l'enveloppe. Le coefficient de transmission thermique est l'inverse de la résistance thermique totale de l'enveloppe et peut être déterminé par la formule 1.1 :

$$U = \frac{1}{R} \tag{1.1}$$

La résistance thermique représente la capacité d'un matériau à résister au passage des flux thermiques à l'intérieur ou à l'extérieur du bâtiment. Elle est en fonction de l'épaisseur du matériau (e) et de sa conductivité thermique (λ) qui est une propriété intrinsèque du matériau. Celle-ci peut être déterminée par l'équation 1.2 et est exprimée par les valeurs RSI (m^2 °C /W) ou (m^2 K /W) en système international (SI) ou R (hr·pi²·°F/Btu) en système impérial (IP) :

$$R = \frac{e}{\lambda} \tag{1.2}$$

On caractérise un produit isolant par sa valeur de résistance thermique. Plus cette valeur est élevée, plus le matériau est résistant. Basé sur l'équation (1.2), pour augmenter la résistance de l'enveloppe, soit on augmente son épaisseur où changer le matériau avec une faible

conductivité thermique. On peut aussi calculer la résistance thermique nominale d'un mur en faisant la somme des valeurs thermiques R des composantes du mur (en série) incluant celles des lames d'air extérieur et intérieur. Des nouvelles méthodes de calcul de valeur thermique R sont publiés tenant compte des ponts thermiques (Régie du bâtiment du Québec, 2012) d'où valeur R de tout l'assemblage appelée valeur R effective.

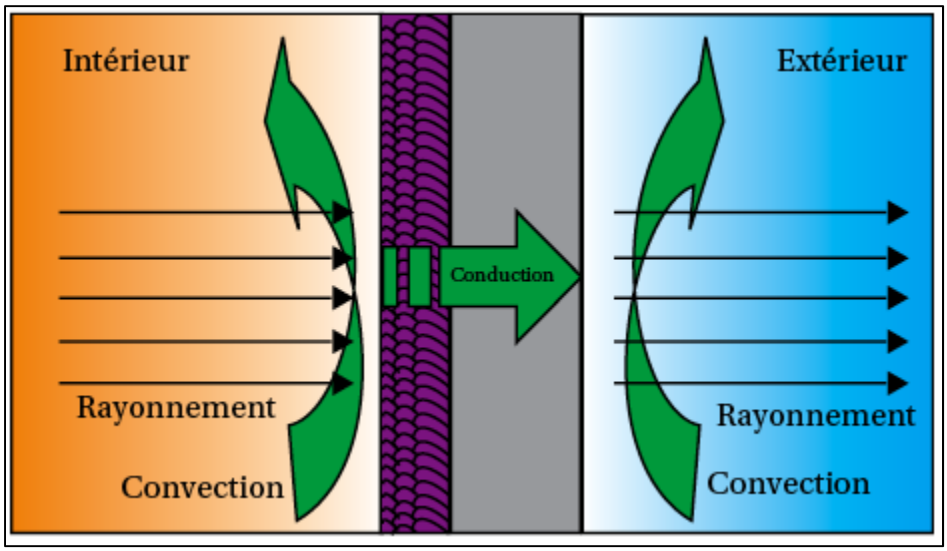


Figure 1.1 Modes de transfert de chaleur dans un bâtiment
Tirée de Kuznik et al. (2011. P. 03)

La figure 1.1 illustre les modes de transfert de chaleur qui se produisent à travers l'enveloppe. Pour limiter la chaleur qui tente de traverser l'enveloppe ou de s'échapper du milieu intérieur vers le milieu extérieur, il est donc nécessaire de concevoir une enveloppe performante. La performance de l'enveloppe est particulièrement liée au choix des matériaux et à la connaissance des conditions climatiques dans lesquelles le bâtiment sera construit. L'augmentation de la performance énergétique des bâtiments permet de réduire la consommation énergétique du bâtiment tout en assurant un bon niveau de confort thermique et en réduisant les émissions de CO_2.

1.1.2 Influence du climat extérieur sur l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment

L'environnement extérieur influence l'implantation du bâtiment et de son architecture (figure 1.2). L'orientation, la typologie, le dimensionnement des portes et des fenêtres du bâtiment sont éventuellement conditionnés en fonction du climat extérieur (Schlueter & Thesseling, 2009). De ce fait, l'évaluation des critères de performance liée à la forme et à l'orientation du bâtiment, aux matériaux et aux systèmes techniques utilisés, doit être faite lors de la conception, afin de limiter les différents échanges (sollicitations) entre le bâtiment et son environnement.

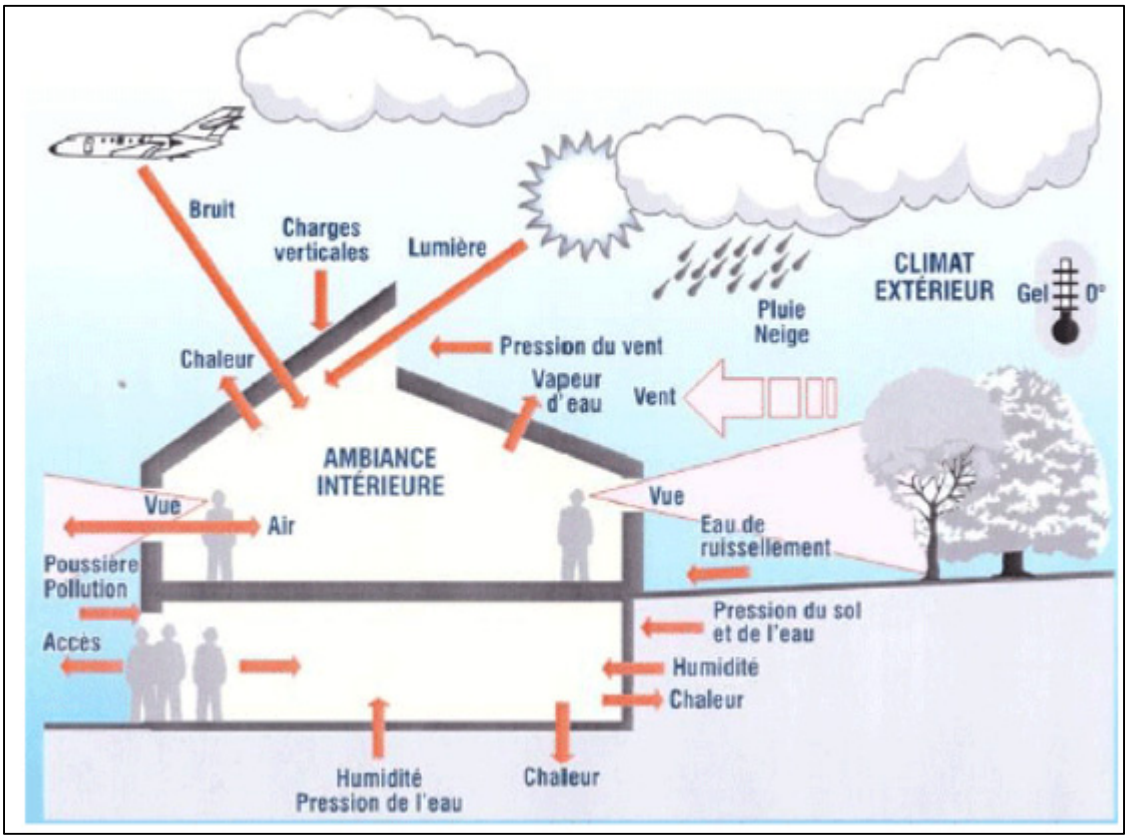


Figure 1.2 Sollicitations extérieures que subit l'enveloppe d'un bâtiment
Tirée de Bernard Sesolis (2015)

La sévérité du climat influence les besoins en énergie pour le chauffage et le refroidissement. De plus, les matériaux utilisés pour la conception de l'enveloppe du bâtiment jouent un rôle considérable dans l'absorption, le stockage et la distribution de l'énergie apportée par le flux

solaire (Hauglustaine et al., 2006). Les composants extérieurs de l'enveloppe subissent l'effet de la pluie, de la neige et de l'humidité extérieure, qui forment la première et la deuxième ligne de défense. Ces effets combinés au manque d'étanchéité de l'enveloppe exposent les panneaux structuraux, comme l'OSB (Panneau à copeaux orientés) et le contreplaqué au risque de condensation interstitielle et de dégradation comme la moisissure (Maref W., 2011, 2015a, 2015b, 2018).

1.1.3 Rôle de l'enveloppe face au climat extérieur

L'enveloppe du bâtiment est une séparation environnementale qui protège le milieu intérieur du bâtiment contre la variation du climat extérieur. De plus, l'enveloppe doit pouvoir gérer le problème de migration de la vapeur d'eau par pression différentielle dû au mouvement d'air (infiltration ou exfiltration) et par diffusion pour éviter les risques de condensation à l'intérieur de l'enveloppe. Le transfert de vapeur par convection à lier lorsqu'il y a une différence de température et de pression d'air entre le milieu extérieur et intérieur; cela peut provoquer une condensation à l'intérieur de l'enveloppe comme la figure 1.3 l'indique.

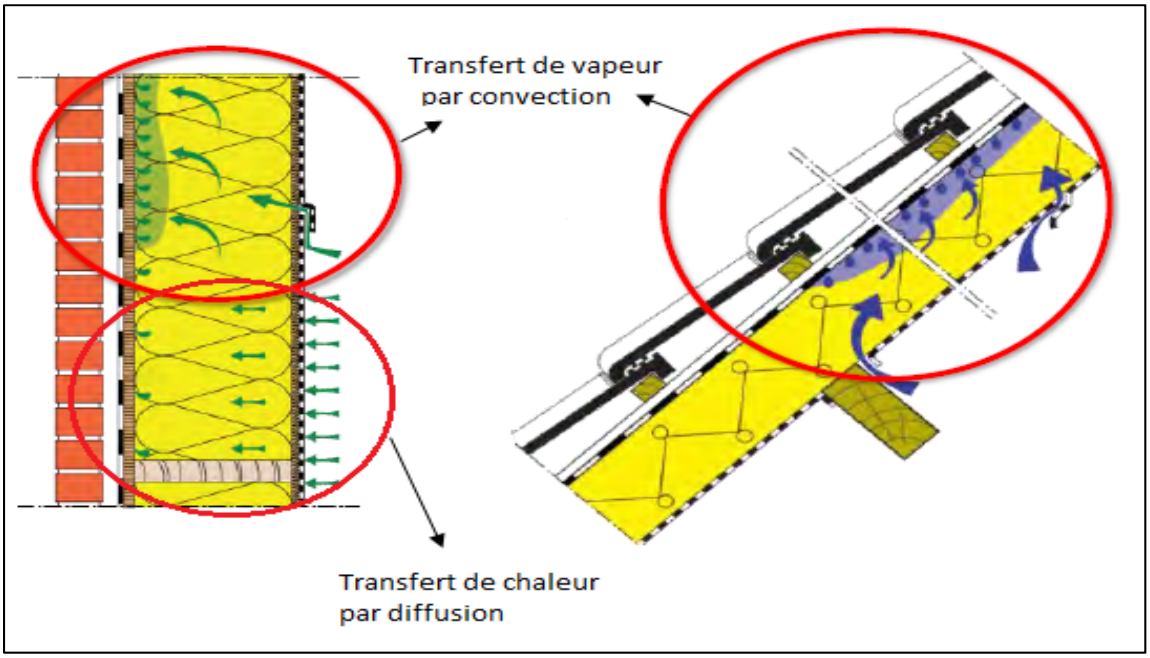


Figure 1.3 Migration de la vapeur d'eau par convection et par diffusion
Tirée de Motte & Spies (2017, p.19)

La vapeur d'eau qui migre vers l'extérieur du mur et de la toiture (figure 1.3) se condense sous forme d'eau sur l'interface du panneau et de l'isolant. Cette condensation d'eau peut provoquer l'apparition des moisissures ou pourriture de l'isolant en cas de séchage très lent. Pour chaque mur, la partie la plus critique des murs qui nécessite une surveillance et une protection contre la condensation est le panneau structural comme le contreplaqué ou l'OSB. Lorsqu'il y a un transfert par convection (i.e. écoulement d'air) dû à une mauvaise étanchéité à l'air, le risque de condensation est plus grand que celui produit par le transfert par diffusion (figure 1.3).

Le transfert de vapeur d'eau par diffusion se produit lorsqu'il y a une différence de pression d'eau. Pour limiter la fuite d'air et le transfert de la vapeur d'eau par diffusion, il convient d'assurer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe. La pose d'un système pare-air est le seul moyen pour rendre l'enveloppe plus étanche à l'air (Hauglustaine et al., 2006). En effet, l'apparence et le fonctionnement de l'enveloppe ont une influence importante sur l'environnement intérieur, le confort, la santé des occupants, la durée de vie du bâtiment et de l'efficacité énergétique (Straube, 2012). L'augmentation de la résistance thermique R de l'enveloppe du bâtiment par exemple en rajoutant de l'isolant rigide ou semi-rigide à l'extérieur, permet de limiter le passage de la chaleur, de maintenir la surface intérieure du panneau (OSB ou contreplaqué) à une température supérieure à la température de rosé afin d'éliminer ou réduire le risque de condensation et suffisamment acceptable pour atteindre la température de confort sans avoir à passer par des systèmes de chauffage et de la climatisation pour satisfaire les occupants. Cela conduit à la réduction des dépenses en énergie pour le chauffage et la climatisation, d'où la réduction des émissions du CO_2.

Les matériaux utilisés pour l'isolation de l'enveloppe du bâtiment sont la clé du bon fonctionnement de celui-ci. La performance des bâtiments est donc liée entre autres à la sélection des matériaux d'isolation de son enveloppe, à une meilleure étanchéité à l'air et à la minimisation des ponts thermiques.

1.2 Demande d'énergie et émissions de gaz à effet de serre

Les bâtiments, leurs environnements ainsi que les entreprises connexes émettent plus de gaz à effet de serre, consomment beaucoup d'énergie et utilisent beaucoup de ressources naturelles (Sozer, 2010). Le secteur de la construction est le troisième émetteur de GES après l'industrie et le transport (Ressources naturelles Canada, 2016). Le secteur résidentiel est responsable d'une grande partie de la consommation d'énergie dans le monde (Pacheco, Ordóñez, & Martínez, 2012). Au Canada en général, la demande en chauffage des bâtiments résidentiels représentait 62 % de la consommation d'énergie totale en 2013, illustré par la figure 1.4 (Ressources naturelles Canada, 2016-2017 ; Whitmore & Pineau, 2018). Au Québec, la demande d'énergie dans les bâtiments s'élève à 31 % de la consommation d'énergie totale en 2015 dont 19 % sont attribués au bâtiment résidentiel (figure 1.5a, Québec 2015). En 2014, le chauffage à lui seul représente 64 % de la consommation totale d'énergie des bâtiments résidentiels (figure 1.5 b, Québec 2014).

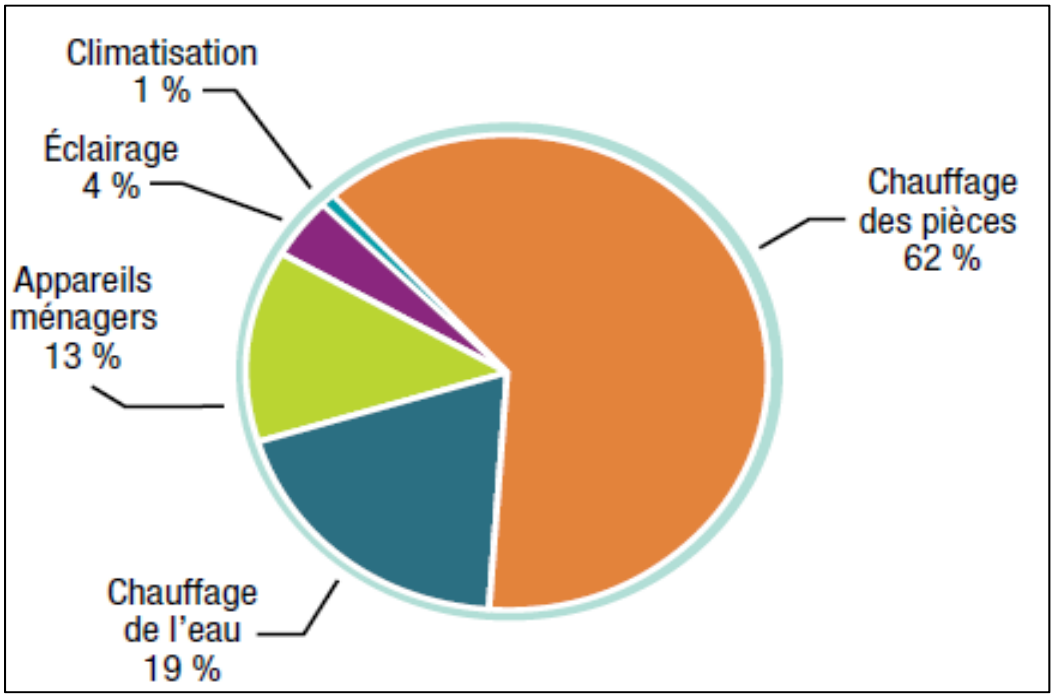


Figure 1.4 Demande d'énergie des bâtiments résidentiels au Canada 2013; Tirée de Ressource Naturelle Canada (2016-2017, p. 109)

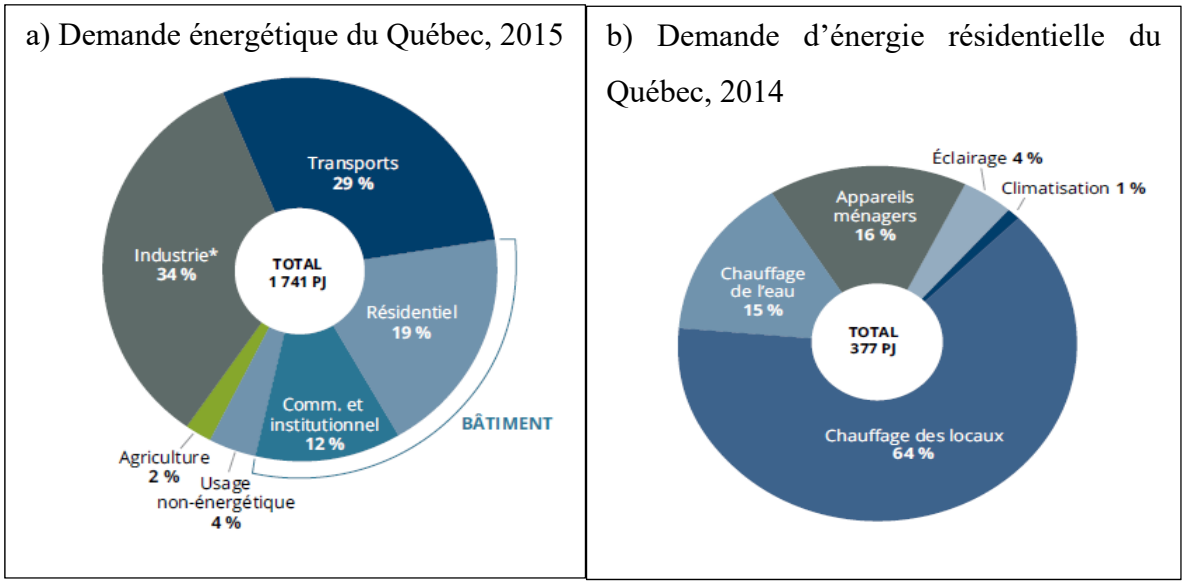


Figure 1.5 Demande d'énergie des bâtiments résidentiels au Québec
Tirée de Whitmore & Pineau (2018, p. 25 & 34)

En ce qui concerne la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'accord de Paris conclu à la COP21 de 2015, qui est de limiter l'augmentation de la température de la planète terrestre en dessous de +2 °C permettrait de canaliser les conséquences du changement climatique (IRIS & GRIP, 2017 ; Schonfeld & Radelli, 2014 ; Sottile, 2011). Le +2 °C représente le seuil de sécurité fixé pour limiter indirectement les émissions de gaz à effet de serre (GES) produites par les secteurs émetteurs potentiels de CO_2, les secteurs du bâtiment, des transports et de l'industrie. L'évolution de la température moyenne en surface du globe terrestre d'ici 2300 présentée par figure 1.6 montre quatre scénarios. Entre les années 2000-2100, l'évolution de la température est comprise entre +0,5 °C et + 5,4 °C, soit une hausse de 4,9 °C correspondants au scénario RCP8.5. Ce scénario correspond à la prolongation des émissions de GES actuelles sans effort de réduction qui entraîne une hausse des températures en surface de la terre d'environ 5,4 °C en 2100.

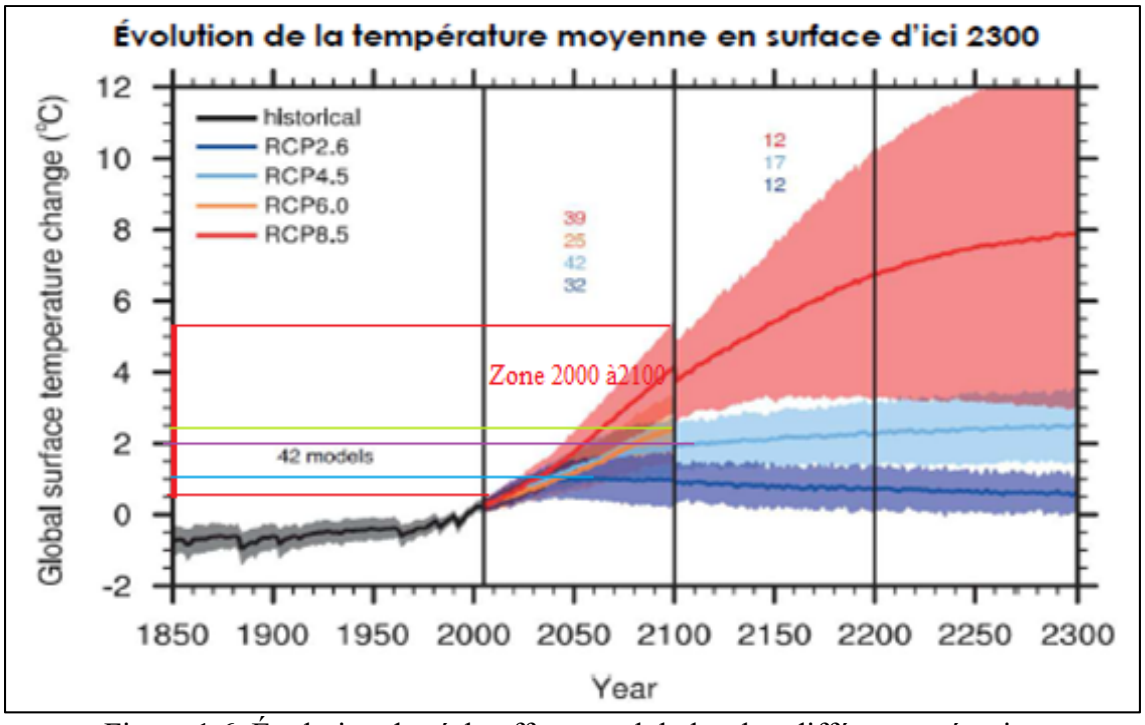


Figure 1.6 Évolution du réchauffement global, selon différents scénarios d'émission de GES; Tirée de IRIS & GRIP (2017, p.10) et Sottile (2011, p.11)

Tableau 1.1 Récapitulation des résultats de la figure 1.6

Hausse de la température (°C) en surface de la Terre d'ici 2100 selon chaque scénario				
Scénario RCP8.5	Scénario RCP6.0	Scénario RCP4.5	Scénario RCP2.6	Limite proposée
+5,4	+2,5	+2	+1	+1,5

Pour atteindre le résultat du scénario RCP2.6 ou le +1°C énuméré dans le tableau 1.1, les secteurs potentiels doivent trouver des solutions pour réduire leurs consommations d'énergie et limiter l'utilisation des énergies fossiles. En ce qui concerne le secteur du bâtiment, particulièrement, le secteur résidentiel, la demande en chauffage et en climatisation augmente progressivement au fil des années en fonction de l'augmentation de la population. D'ici 2050, la population du Québec comptera un peu plus de 9,8 millions d'habitants, elle dépassera 10 millions d'habitants en 2061. La croissance du nombre de logements causée par l'augmentation de la population entraîne une hausse de la demande en chauffage et en climatisation des espaces d'habitation. Cette augmentation influence la demande énergétique et de l'émission de GES de plusieurs façons (Institut de la statistique du Québec, 2014). En

2011, les émissions de GES représentaient au total 700 Mteq. CO_2 et en 2013, 716 Mteq. CO_2 soit 16 Mteq CO_2 de plus en 2 ans au Canada (Environnement et Changement Climatique Canada, 2018). Et 46 Mteq.CO_2 sont attribuées à l'émission de GES des bâtiments résidentiels en 2011 et 44 Mteq.CO_2 en 2013, soit une réduction de 2 Mteq.CO_2 en 2ans (Environnement et Changement Climatique Canada, 2018). La demande en chauffage des locaux résidentiels représente 61,1 % de la consommation totale résidentielle et la climatisation 1,5 % en 2011, tandis qu'en 2013, le chauffage représente 63 % et la climatisation 1 %, soit une augmentation de 1,9 % pour le chauffage et une réduction de 0,5 % pour la climatisation (Politique Énergétique 2011-2025). La figure 1.7 présente les émissions de GES du secteur résidentiel par scénario de 2005 à 2030.

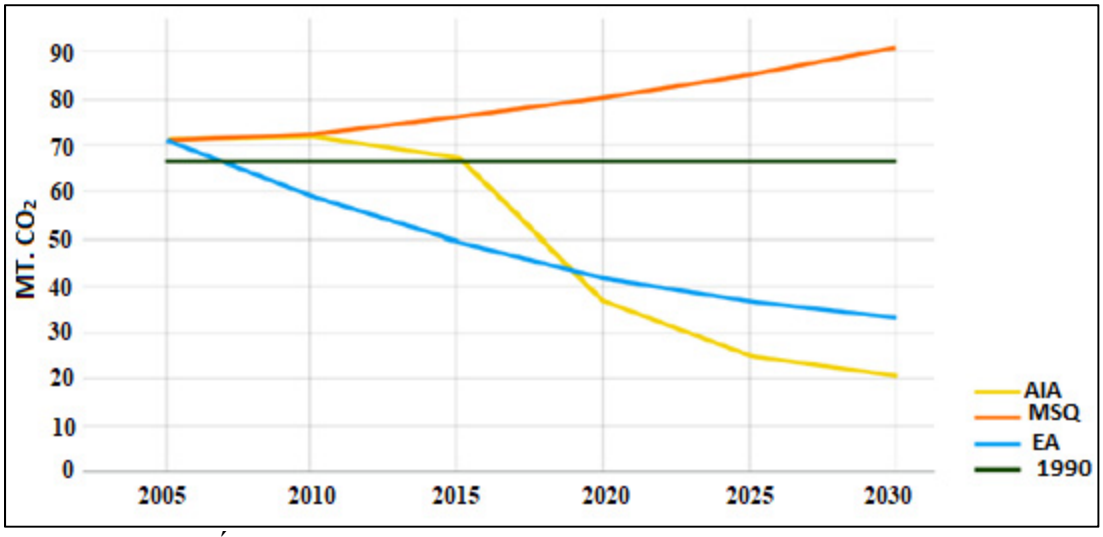


Figure 1.7 Émissions de GES du secteur résidentiel, par scénario – Canada
AIA : Amélioration continue du rendement énergétique, Défi 2030
MSQ : Maintien du statu quo ou maintien à l'état actuel sans prise de décision
EA : Écologisation accélérée
Tirée de Simard (2009, p.26)

Pour atteindre les objectifs économiques et environnementaux, fixés par le Canada dans le contexte de la demande énergétique, l'intégration des politiques, des pratiques et des comportements favorisant l'efficacité énergétique pour un changement vers une culture plus respectueuse de l'environnement est nécessaire. Il est donc crucial d'adopter une approche centrée sur le carbone, qui est le facteur principal de l'empreinte des émissions de GES. Les

systèmes connexes utilisés pour l'amélioration du confort thermique des occupants participent fortement à ces émissions. Pour réduire l'utilisation des systèmes connexes tout en maintenant le confort thermique, les bâtiments doivent être étanches à l'air et construits avec des matériaux écologiques et économes en énergie. Intégrer les matériaux biosourcés dans la construction représente une solution pour contribuer à la réduction des émissions des gaz à effet de serre (Liuzzi, Sanarica, & Stefanizzi, 2017 ; Rahim, Douzane, Le, & Langlet, 2016). Ces matériaux présentent un faible impact environnemental et sont des excellents régulateurs thermiques. Parmi les matériaux biosourcés, le béton de chanvre est l'un des matériaux qui présentent des avantages prometteurs en plus du bois, sur le plan écologique et économique, pouvant être utilisés dans les pays continentaux humides, dont fait partie le Canada et dans les pays présentant des climats très chauds par exemple, le Burkina Faso. Le bois est l'un des matériaux biosourcés écologiques utilisés au Canada dans la construction. Au Burkina Faso, le matériau de construction dominant et disponible est la terre. Les matériaux issus de la terre se présentent sous plusieurs aspects, par exemple la brique de terre comprimée ou cuite, la brique de latérite taillée, adobe, etc.

1.3 Bois dans la construction

Selon (Pajchrowski, Noskowiak, Lewandowska, & Strykowski, 2014), les maisons dotées des systèmes de murs à base de bois consomment environ 15 % à 16 % moins d'énergie totale à des fins non chauffantes ou rafraîchissantes. Les émissions nettes de gaz à effet de serre associés à ces consommations sont inférieures de 20 % à 50 % des émissions des maisons thermiquement comparables à la construction à base de béton ou d'acier (Börjesson & Gustavsson, 2000 ; Gustavsson & Sathre, 2006 ; Pajchrowski, Noskowiak, Lewandowska, & Strykowski, 2014 ; Upton, Miner, Spinney, & Heath, 2008). L'étude menée par le centre d'expertise sur la construction commerciale en bois (CECOBOIS) a démontré que l'utilisation d'une poutre en bois cause près de 5 fois moins de CO_2 que celle en béton et environ 6,5 fois moins que celle de l'acier (CECOBOIS, 2017; Pajchrowski, Noskowiak, Lewandowska, & Strykowski, 2014). Dans cette même étude, il en ressort que l'utilisation de $1m^2$ de bois permet d'éviter l'émission de 1000 kg de CO_2 (CECOBOIS, 2017). La durée de

vie des matériaux de construction en bois peut atteindre 75 ans en moyenne et 400 ans au maximum (Goverse, Hekkert, Groenewegen, Worrell, & Smits, 2001). Cette durabilité est l'une des caractéristiques très intéressantes pour la construction. Plusieurs matériaux de construction sont issus du bois (figure 1.8).

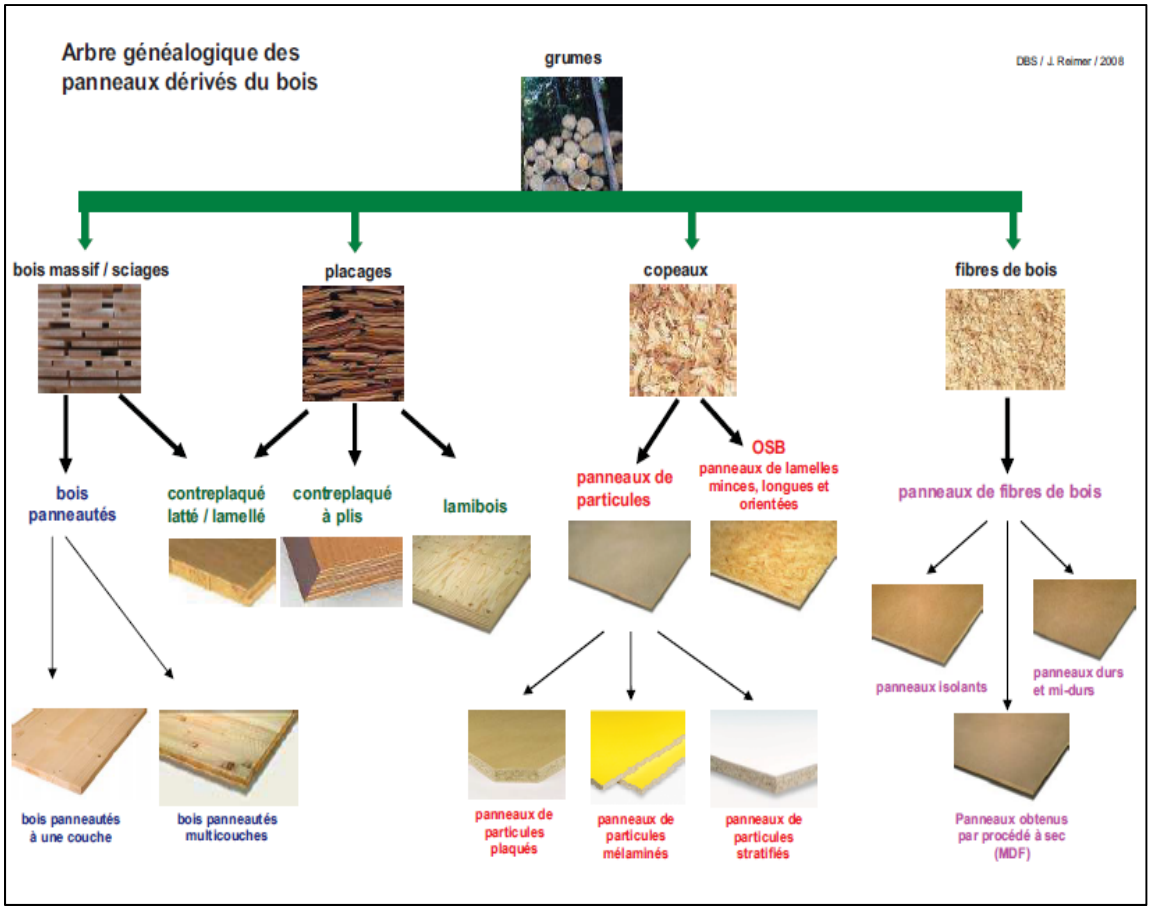


Figure 1.8 Différents matériaux issus de bois
Tirée de DBS/J. Reimer (2008)

Le tableau 1.3 illustre les émissions de gaz à effet de serre des différents matériaux utilisés dans la construction. Ces émissions sont données sous forme de valeur. Les valeurs attribuées aux matériaux en bois et de ces dérivés sont négatives contrairement aux autres matériaux qui présentent des valeurs positives. Les valeurs négatives obtenues après une analyse de cycle de vie d'un matériau concernant l'émission de CO_2 montrent que ce matériau contribue à la réduction de l'émission des gaz à effet de serre (Evrard Arnaud & De Herde André, 2010),

tandis que les valeurs positives contribuent à l'augmentation de ces émissions (voir tableau 1.3). Les métaux et les isolants possèdent une énergie grise et des émissions de CO_2 élevés. La fabrication de ces matériaux ne favorise pas la lutte contre le changement climatique vu qu'il favorise l'augmentation des émissions du CO_2. Par définition, l'énergie grise est la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et à la gestion de fin de vie (Niyigena, 2016b). Les émissions de CO_2 associées sont l'ensemble des rejets de dioxyde de carbone dans l'atmosphère du a la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et à la gestion de fin de vie de ces matériaux (Evrard Arnaud & De Herde André, 2010; Niyigena, 2016b).

Tableau 1.2 Énergie grise et émissions de dioxyde de carbone de différents matériaux de la construction; Tiré de Arnaud & André (2010, p.16)

		Masse volumique [kg/m3]	Energie grise [MJ/kg]	Emission de CO2 [kg CO2/kg]
BETON	bloc creux	1200	0,91	0,14
	blocs lourd et semi-lourd	2000-2400	0,8	0,13
	charges élevées	2400	1,2	0,15
	dalle de sol/semelle filanto	2400	0,8	0,13
	hourdis	1400	0,8	0,13
	béton cellulaire autoclavé	600	4,3	0,48
	béton léger argile expansée	1200	5,2	0,38
	béton maigre	2000	0,4	0,05
METAUX	acier-beaucoup d'alliage	7850	102,4	6
	acier- peu d'alliage	7850	32,4	1,8
	acier d'armature (100% recyclé)	7850	13,3	1,8
	aluminium-tôle	2700	116,1	7,18
	aluminium (100% recyclé)	2700	19,5	1,08
	cuivre- tôle	890	103	5,48
	zinc-tôle	7150	84,5	4,93
AUTRES MINERAUX	brique pleine	800-1000	5,2	0,38
	brique creuse	650	5,2	0,38
	pierre naturelle européenne/locale	2400-2800	0,3	0,01
	verre plat	2500	12,9	0,98
ISOLANT	cellulose-matelas souples	70	21,2	1,61
	cellulose-flocon	30	4,6	0,23
	laine de roche	60-130	22,7	1,6
	laine de verre	20-110	33,8	1,56
	perlite expansée	135-165	10,4	0,52
	polystyréne expansé (EPS)	15-30	120,4	4,01
	polystyréne extrudé (XPS)	15-20	108,4	3,73
	polyuréthane (PUR)	40	106,5	13,7
	verre cellulaire	120-150	22,9	1,26
BOIS ET DERIVES	MDF	750-800	39,5	-1,27
	OSB	500	45,8	-1,25
	panneaux de particules tendres	180	41	-0,09
	bois lamelle collé	500	32,8	-1,26
	bois massif feuillus européen	800	40,3	-1,65
	bois massif résineux européen	600	31,4	-1,63
AUTRES	étanchéité bitumineuse	1100	51,8	1,16
	linoléum	1200	60,8	0,37
	plaque de fibroplatre	1200	5,28	0,27
	plaque de platre cartonnée	900	5,8	0,22
	PVC-étanchéité	1200	22,2	2,19
	PVC-feuille	1500	86,9	3,91
	tapis plein synthétique	300	84,5	4,05
	viny	1500	86,9	3,91

1.3.1 Avantages de l'utilisation du bois dans la construction

Les études ont montré que les matériaux à base de bois conféraient aux bâtiments des caractéristiques avantageuses telles que le confort de vie, la santé, le bien-être et l'esthétique. En effet, le bois est un matériau écologique, durable, renouvelable, respectueux de

l'environnement et contribue à lutter contre les émissions des gaz à effet de serre (Conseil canadien du Bois Québec, 2016). De nombreuses études d'évaluation du cycle de vie ont prouvé que les produits en bois ont une empreinte écologique moins importante que les principaux produits de construction (Conseil canadien des Ministres des Forets, 2017).

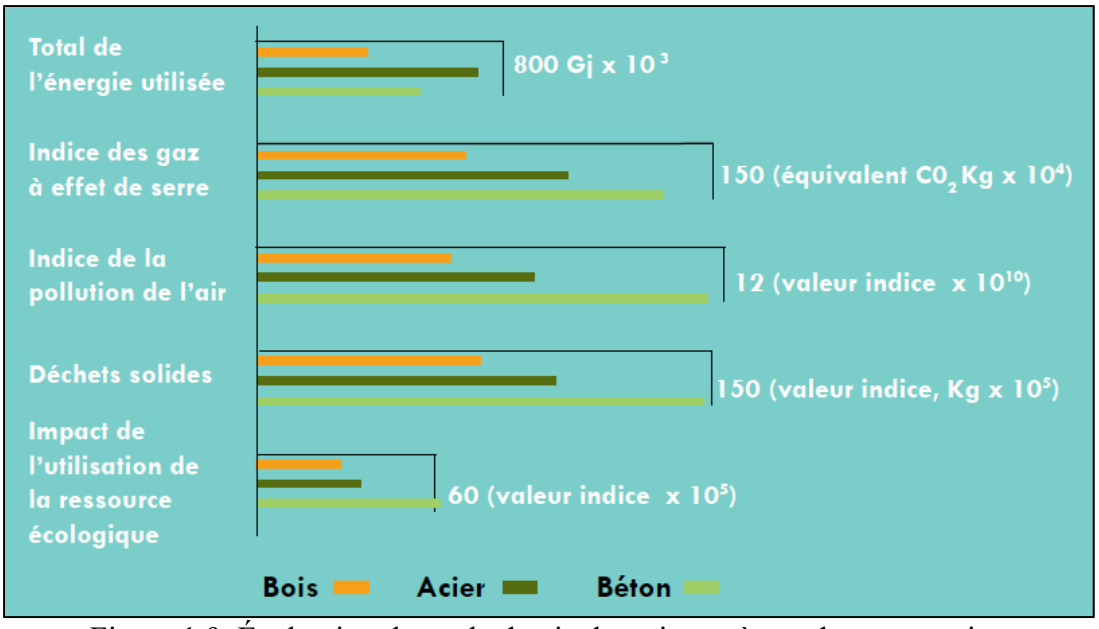


Figure 1.9 Évaluation du cycle de vie de trois systèmes de construction
Tirée de Michael C. (2011, p.3)

Les effets environnementaux du mur en bois sont inférieurs aux deux autres matériaux de construction figurant sur la figure 1.9. En effet, la construction des bâtiments évolue en fonction du changement de climat, il est donc préférable de concevoir des bâtiments qui peuvent être facilement adaptés à la nouvelle utilisation en fin de vie. Toutefois, l'ossature de bois occupe depuis des années, un rôle prépondérant dans la construction des maisons sécuritaire et confortable, en particulier en Amérique du Nord (Conseil canadien du Bois Québec, 2016). Le Canada est l'un des plus grands producteurs et exportateurs de bois d'œuvre résineux au monde, qui représente 20 % de la valeur des exportations de produits forestiers canadiens (Ressources naturelles Canada, 2018a) et utilisés dans la construction.

La figure 1.10 illustre des exemples de construction en bois croisé lamellé de 6 étages au Canada.

Figure 1.10 Construction en bois typique au Canada
Tirée de ressource naturelle Canada (2018 b)

Actuellement, le code national du bâtiment (CNB) du Canada limite le nombre d'étages des bâtiments en bois à six (CNB 2015). En collaboration avec le Conseil National de Recherche Canada (CNRC), le Conseil Canada du Bois (CCB) et FPinnovations et Ressources Naturelles Canada (RNCan) appuient les révisions du CNB en vue de l'édition 2020 afin d'autoriser la construction des bâtiments en bois d'au plus 12 étages (Ressources naturelles Canada, 2018b).

1.3.2 Gestion de l'humidité dans les bâtiments à ossature de bois

Le bois est un matériau hygroscopique capable de libérer ou d'absorber l'humidité pour avoir un taux d'humidité en équilibre avec son environnement. Une absorption excessive de l'humidité peut favoriser la croissance des champignons et la pourriture du bois. Pour éviter cette croissance et assurer la durabilité des bâtiments à ossature de bois, la conception de la

structure doit être basée sur la compréhension des facteurs influençant la teneur en humidité du bois (SCHL, 2013).

- Comme facteur primordial, la teneur en eau du bois de construction au moment de l'utilisation ne doit pas être supérieure à 19 %. La saturation des fibres du bois est en moyenne environ 28 %. Le risque d'apparition des moisissures peut être positif pour des valeurs de saturation supérieure à 28 %,
- Le type de construction et d'orientation doit être étudié avant la construction afin de limiter les effets de la pluie battante,
- L'épaisseur du mur de fondation doit être en fonction de la hauteur, du nombre d'étages du bâtiment.

Le bois non traité et les produits à base de bois ne se dégradent pas s'ils sont mouillés par intermittence pendant de courtes périodes à des teneurs en humidité supérieures à la saturation des fibres (Morrell, 2002) et si on est aussi dans des endroits où il y a un potentiel de séchage comme Montréal avec un indice d'humidité de 0.92 (IM – voir CNB), mais pas à Vancouver (BC) où il y a un fort potentiel de mouillage et un faible potentiel de séchage avec un indice d'humidité proche de 1.4. Dans les zones où le IM est supérieur à 1, une attention particulière doit être faite afin éviter les risques de condensation et de mouillage d'où la nécessité d'un bris capillaire. L'hygroscopie joue un rôle très important sur la durabilité des constructions (Natterer, 2004 ; Seddik, 2006). Pour un mur à ossature de bois, la présence d'une finition intérieure en panneau de gypse est très importante, cela permet de protéger l'ossature des flammes et d'augmentation de la chaleur (Frenette, 2009). Les fibres de bois sont des isolants utilisés dans l'isolation de l'enveloppe du bâtiment depuis des siècles et possèdent des caractéristiques physiques très intéressantes. Le tableau 1.4 illustre ses caractéristiques.

Tableau 1.3 Caractéristique physique des matériaux à base de bois.
Tiré de Auvergne, Ademe, Haute-Loire, & grande (s.d, p.17)

	Fibre de bois en vrac	Panneau semi-rigide faible densité	Panneau rigide moyenne densité	Panneau rigide haute densité
Densité ρ [kg/m^3]	38 à 45	35 à 50	60 à 120	140 à 280
Conductivité thermique [W/m °C]	0.038 à 0,042	0.038 à 0,042	0.038 à 0,042	0.038 à 0,055
Chaleur spécifique C [J/kg K]	1600 à 2300	1600 à 2300	1600 à 2300	1600 à 2300
Coefficient de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ [-]	1 à 2	1 à 2	3 à 5	3 à 5

En effet, ils ont une capacité isolante plus élevée en termes de gestion d'humidité par rapport aux autres fibres utilisées dans la construction.

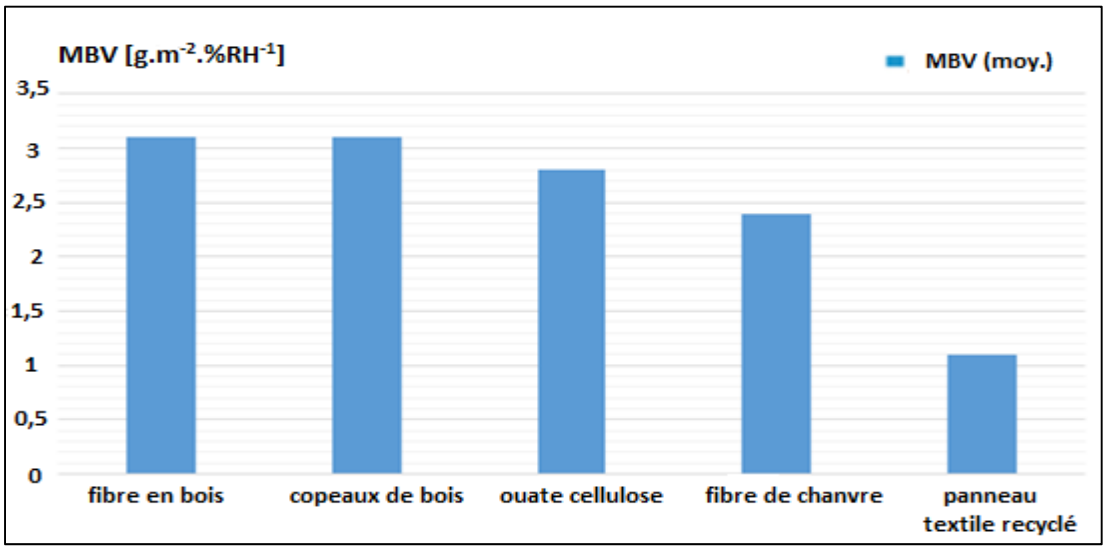


Figure 1.11 Valeur tampon d'humidité
Tirée de Mnasri, Ganaoui, Khelifa, & Gabsi (2017, p. 172 [06])

La valeur tampon d'humidité représente la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air environnant. En observant la figure 1.11, le bois prend la première place en gestion d'humidité. Cependant, l'ouate cellulose et les fibres de chanvre présentent des valeurs acceptables qui permettent de les classer parmi les isolants performants et économiques avec de faibles énergies grises.

1.3.3 Exemple des systèmes de mur à ossature de bois

Pour améliorer la durabilité et le bon fonctionnement des enveloppes à ossature de bois dans les pays continentaux humides et subarctiques, les éléments de protection telle que les pare-air, les pare-intempérie et les pare-vapeur sont utilisés. L'utilisation des pare-air consiste à rendre l'enveloppe du bâtiment très étanche à l'air. Le pare-air empêche les fuites d'air chaud ou froid à travers l'enveloppe. Les parements ou revêtements extérieures protègent le mur contre la pluie battante, et les tempêtes de neige. Un exemple de mur a été illustré dans les travaux de (Frenette, 2009) présentant chaque élément de l'enveloppe (figure 1.12). Le revêtement extérieur est la première ligne de défense de notre bâtiment et de l'enveloppe. Les pare-intempéries par exemple sont la deuxième ligne de défense contre la pluie battante et autre.

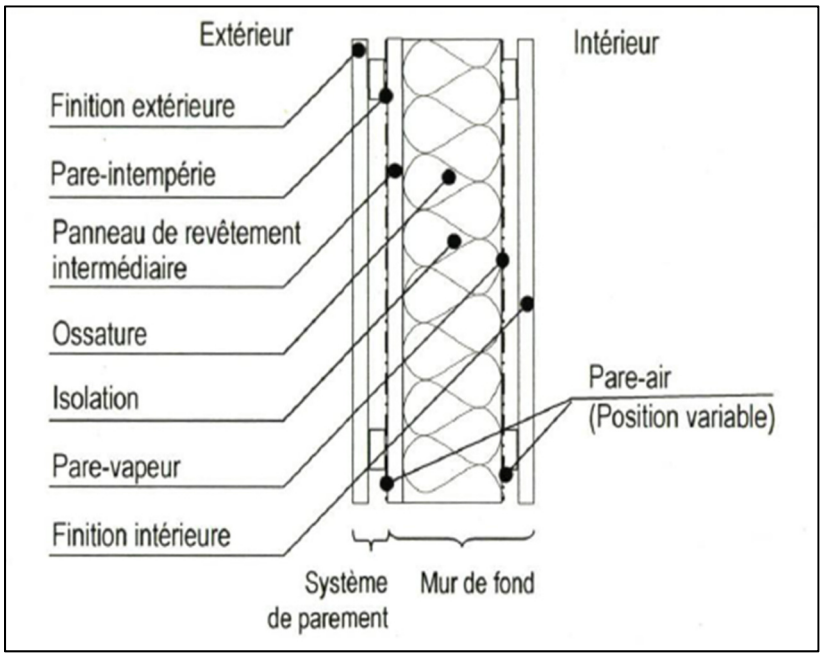


Figure 1.12 Composition des murs à ossature de bois
Tirée de Frenette, (2009, p.24)

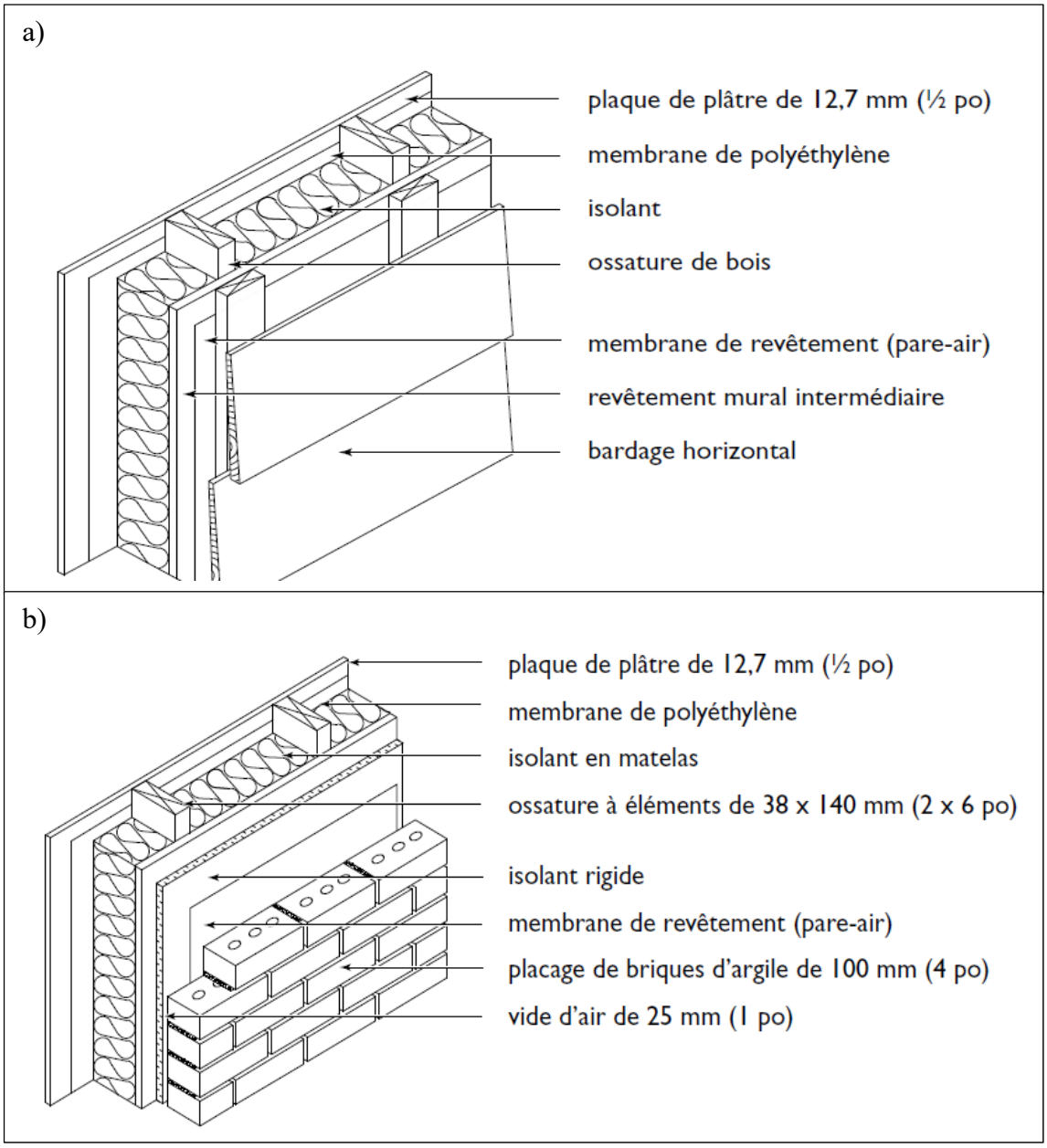


Figure 1.13 Exemple de murs à ossature de bois
Tirée de SCHL (2013, p. 79-80)

La finition extérieure ou revêtement extérieur ou encore parement extérieur est un matériau qui doit être robuste pour résister aux charges extérieures comme les pluies battantes, les vents violents et les tempêtes de neige. Son rôle est de protéger tous les éléments du bâtiment tandis que la finition intérieure a pour rôle de protéger le pare-vapeur. Le pare-vapeur assure le freinage de la diffusion de l'humidité à travers le mur et permet de prévenir l'atteinte de la

vapeur d'eau la surface froide en cas de fuites d'air où température sera en dessous de la température de rosée. Les matériaux utilisés comme finition extérieure sont souvent la brique, la pierre, le revêtement de vinyle, le fibrociment, le bardage de bois, etc. (figure 1.13). Pour la finition intérieure, la majorité des concepteurs utilise le matériau gypse ou le plaque de plâtre intérieur (figure 1.13). Les lames d'air ventilées permettent d'évacuer l'eau qui traverse la finition extérieure. Elles permettent la ventilation pour sécher l'air afin de limiter le risque de condensation. Le panneau de revêtement intermédiaire et le pare-intempérie protègent l'ossature et l'isolant, et ce dernier assure la résistance thermique du mur.

L'isolation sert à améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment et assure le confort des occupants. L'isolation a une grande influence sur les impacts environnementaux. Il occupe un grand volume dans le mur et détermine aussi l'efficacité énergétique (Frenette, 2009). Quelques isolants utilisés dans la construction sont les suivants : la laine de verre, la fibre de cellulose, le polystyrène expansé et extrudé, la mousse de polyuréthanne, la paille, les mélanges terre-paille, le typha, la laine de chanvre, laine de bois, etc. Quant à l'ossature, il est l'élément de soutien du mur et il doit être très rigide pour pouvoir supporter les charges dues à la gravitation et les pressions du vent. Chaque composant du mur joue un rôle dans le comportement hygrothermique du mur.

1.4 Chanvre dans la construction

Le chanvre est une plante herbacée cultivée par l'homme et appartient à la famille des cannabis Sativa. Il est utilisé depuis des siècles dans la réalisation des vêtements, des cordes, de la laine, des bétons de chanvres, des enduits en raison de la résistance de ses fibres (Chamoin, 2013 ; Scheifel, Bill, & Kemptville, 2000). Ses graines oléagineuses sont utilisées pour la production de l'huile et possèdent des vertus médicinales (Chamoin, 2013). Toute la partie de la plante est utilisée pour divers besoins (Rahim et al., 2015). Sa production mondiale est estimée à environ 120 000 tonnes par an (Youssef, 2017). Le chanvre est devenu un matériau de construction et un isolant en France à la fin des années 80 et possède

de nombreuses qualités environnementales (Bocquet, 2013). En effet, la France est le plus gros producteur de chanvre en Europe avec 65 000 tonnes de paille pour une surface cultivée de l'ordre de 8000 hectares (Youssef, 2017).

1.4.1 Composition de la plante de chanvre et avantages liées à sa culture

La culture du chanvre nécessite peu d'engrais, peu d'irrigation, il peut atteindre 4 m de hauteur en 4 mois (Shea, Lawrence, & Walker, 2012). C'est un excellent stoker de CO_2 en court de culture. Un hectare de chanvre stocke plus de CO_2 qu'un hectare de forêt (Chabaud, 2015; Nathalie, 2017). Un hectare de chanvre stocke 10 tonnes de CO_2 par an (Groupe Orvert Ltée, 2013), tandis que un hectare de foret 6,4 tonnes de CO_2 par an (Groupe Orvert Ltée, 2013; Nathalie, 2017).

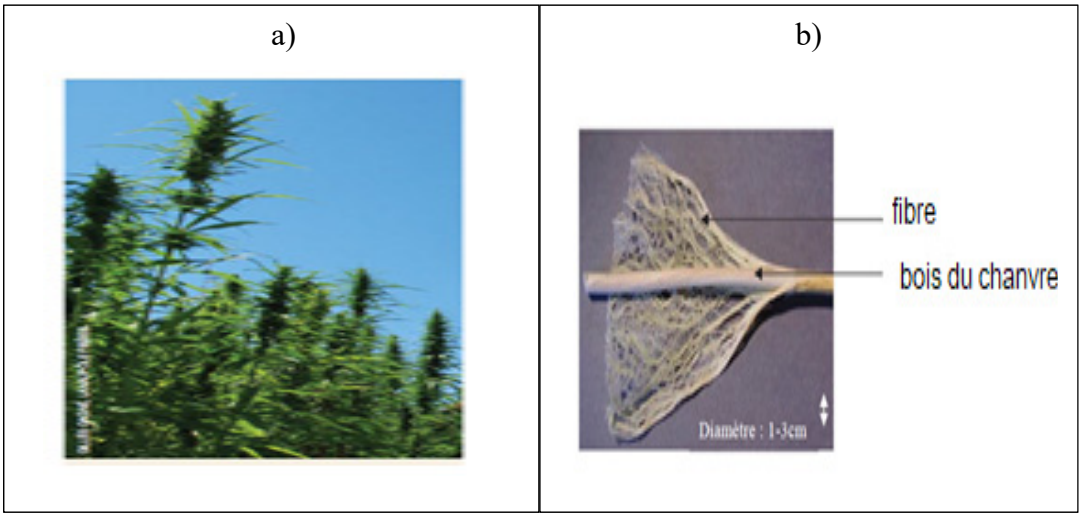


Figure 1.14 Plantes de chanvre (a) et la composition de la tige de chanvre (b)
Tirée de Chabot (2010, p. 02) et de Chamoin (2013, p. 17)

La figure 1.14 illustre les plantes de chanvre et la composition de sa tige. Le potentiel de la plante de chanvre réside dans la paille qui représente 1 à 25 tonnes/ha. Une tonne de paille donne 30 % de fibres, 55 % de chènevotte et 15 % de poussière (Samri, 2008). Ces fibres et ces chènevottes sont les plus utilisées dans la construction et dans l'industrie. La chènevotte

est la tige du chanvre enveloppée par les fibres (figure 1.15). Il possède une structure extrêmement poreuse (figure 1.16), lui conférant un pouvoir isolant intéressant.

En matière d'énergie grise, la laine de verre a besoin de 6 fois plus d'énergie pour être produite que la laine de chanvre. Par définition, l'énergie grise est la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et à la gestion de fin de vie (Niyigena, 2016b). En effet, l'énergie grise de la laine de chanvre est de 35kWh/m^3 alors que celle de la laine de verre est de 250Kwh/m^3 (Jordan Cieski, 2015).

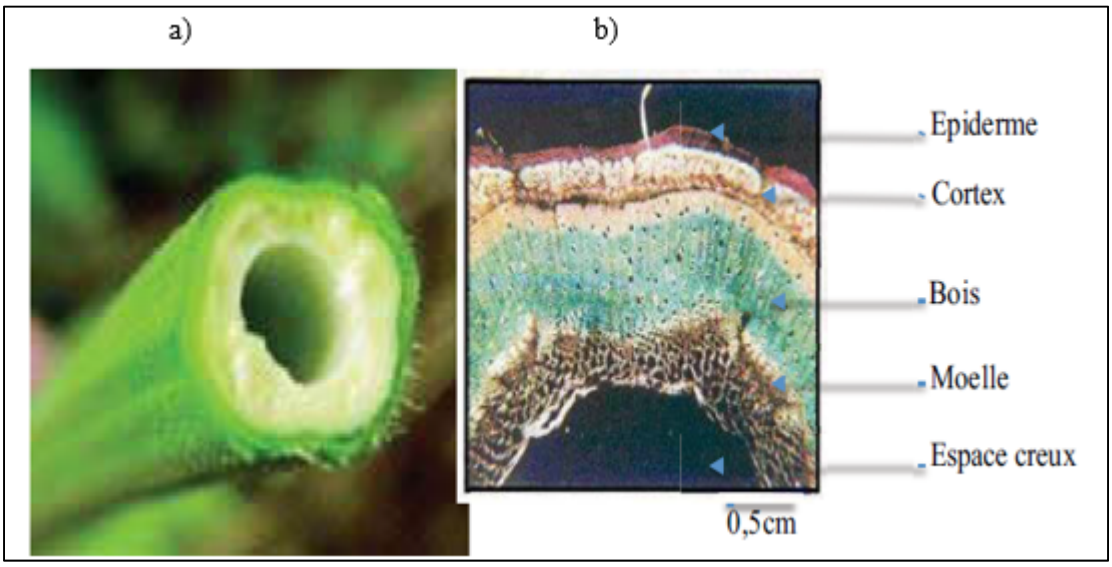


Figure 1.15 Tige de chanvre (a), Micrographie d'une coupe d'une tige de chanvre (b)
Tirée de Niyigena (2016, p.24)

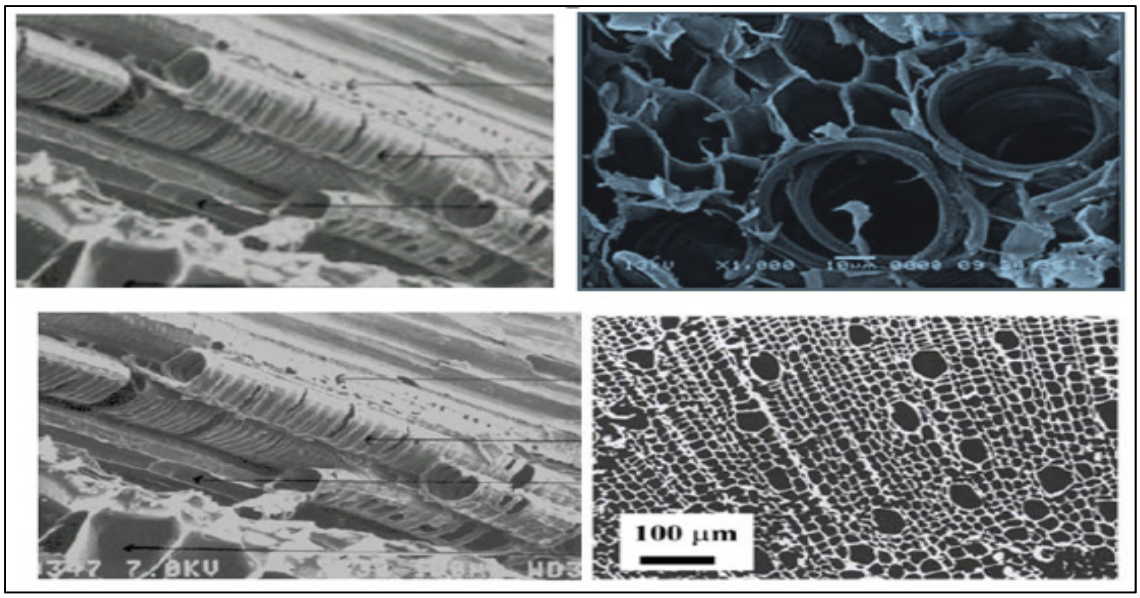


Figure 1.16 vue au microscope électrique à balayage MEB de la porosité de la tige du chanvre; Tirée de Chamoin (2013, p.27)

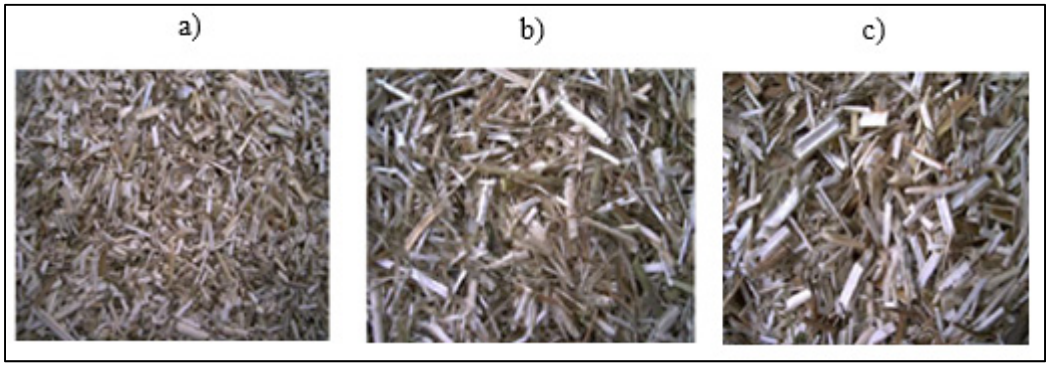


Figure 1.17 Chènevotte de finition (a), chènevotte fibrée pour dalle (b) et chènevotte standard pour isolation (c) ; Tirée de Fruchard (2017, p.03)

Chaque type de chènevotte présenté sur la figure 1.17 est utilisé de manière différente pour satisfaire les exigences d'un bâtiment écologique et durable (Fruchard, 2017). La chènevotte est utilisée en mélange avec de la chaux et de l'eau pour la réalisation des enduits muraux, des mortiers et du béton de chanvre (figure 1.18), mais en vrac, il sert à remplir les cloisons ou les combles.

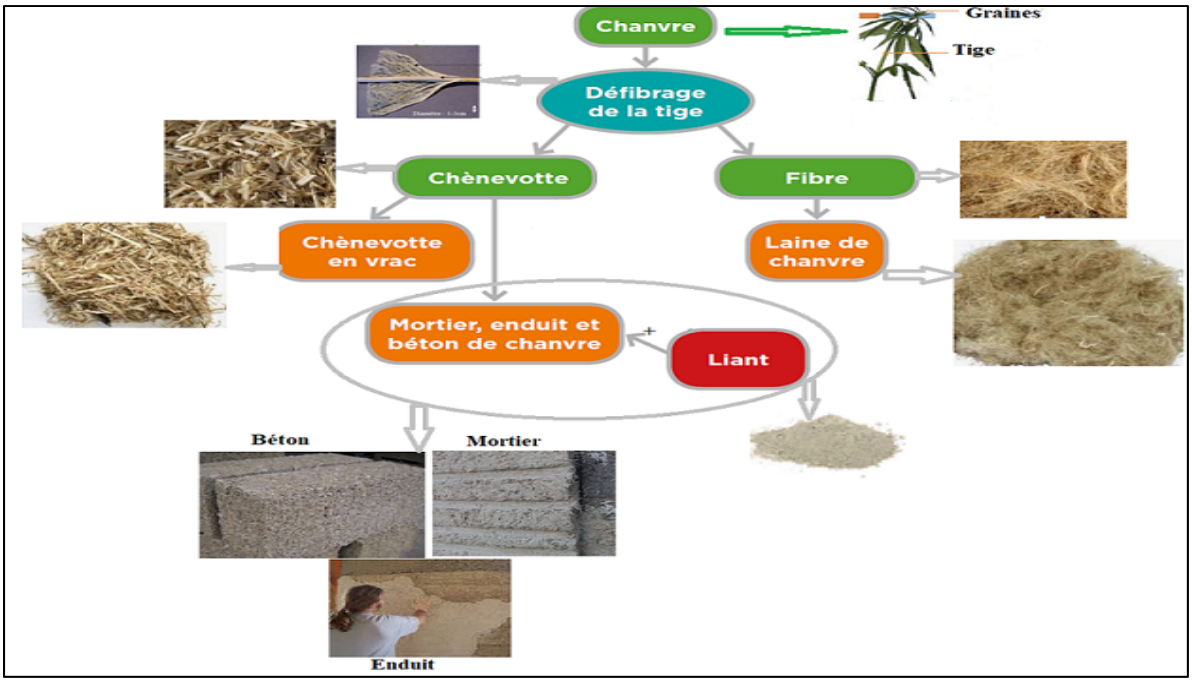


Figure 1.18 Différents matériaux issus du chanvre

1.4.2 Liant

Plusieurs types de liants sont utilisés pour la fabrication du béton de chanvre tels que la chaux, le ciment, la pouzzolane (Niyigena, 2016a). En général, le béton de chanvre est un mélange de chaux (chaux hydraulique + chaux aérienne + pouzzolane ou du sable), de chènevotte et de l'eau. Les liants Tradichanvre et PF70 utilisés dans l'étude de (Samri, 2008), (Collet, 2004) et (Cérézo, 2005) sont à base de la chaux aérienne et de la Chaux hydraulique dont la composition est illustrée par le tableau 1.5.

Tableau 1.4 Compositions massiques et volumiques des liants PF70 et Tradichanvre
Tiré de Samri, (2008, p.30)

Liant	Masse			Volume			
	Chaux hydraulique	Chaux aérienne	Sable	Chaux hydraulique	Chaux aérienne	Pouzzolane	Sable
PF70	37 %	63 %	-	15 %	75 %	10 %	-
Tradichanvre	22 %	58 %	20 %	10 %	55 %	-	35 %

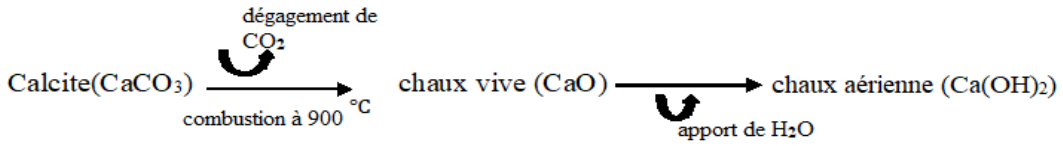
Les liants hydrauliques (ciments, chaux aérienne, chaux hydraulique, pouzzolanes) permettent d'activer la carbonatation et de favoriser un durcissement plus rapide afin d'apporter des résultats plus satisfaisants (Youssef, 2017).

1.4.2.1 La chaux

La chaux est un matériau poudreux issu de la décomposition de la calcite ($CaCO_3$) contenue dans le calcaire sous l'effet de la chaleur. La combustion se fait dans un four à une température supérieure à 900°C. Il existe plusieurs types de chaux selon les étapes de la combustion : la chaux vive (CaO), la chaux aérienne ($Ca[OH]_2$) et la chaux hydraulique. La chaux hydraulique est obtenue par la combustion d'une calcite riche en silice (SiO_2) et en oxyde de fer (Fe_2O_3) à une température comprise en 800°C et 1500°C. Plus la température est élevée et le taux de silice est important, plus la chaux est hydraulique.

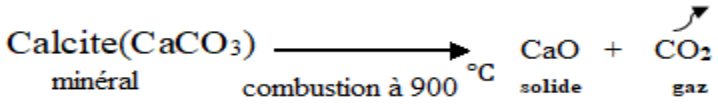
Les étapes de la fabrication de la chaux sont énumérées par les équations suivantes :

Équation générale



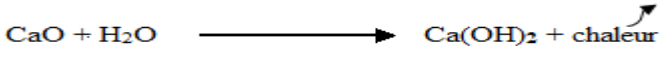
Équation pour chaque étape

- De calcite ($CaCO_3$) à chaux vive (CaO)



Cette réaction s'accompagne d'une perte de masse de près de 45 % de la masse totale.

- De chaux vive (CaO) à chaux aérienne



- Prise de la chaux aérienne

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O$$

La prise de chaux aérienne revient à ramener le produit final (chaux aérienne) à l'état initial (calcaire).

- Prise de la chaux hydraulique (Samri, 2008)

$$\text{Chaux hydraulique } 2CaO, SiO_2 \xrightarrow{H_2O} Ca(OH)_2 \; CaO, SiO_2nH_2O$$

1.4.3 Béton de chanvre dans la construction

Le béton de chanvre est un matériau composite poreux hétérogène, non porteur et est obtenu en mélangeant le liant à base de chaux, de l'eau et des particules végétales de chanvre (chènevotte) comme l'indique la figure 1.19.

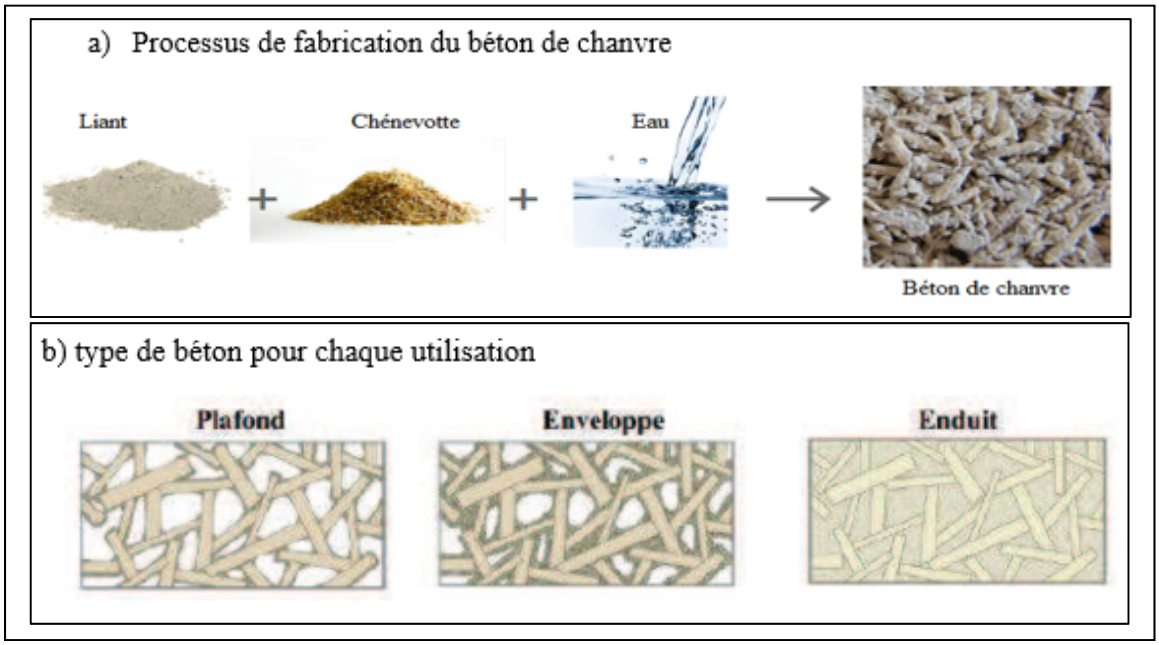


Figure 1.19 Composition du béton de chanvre (a) et schématisation de la matrice en fonction de l'utilisation [Evrard, 08] (b)
Tirée de Chamoin (2013, p.36) et Fourmentin (2015, p.18)

Pour la formulation des différents matériaux à base du chanvre, une proportion de chaque composant est utilisée. Le tableau 1.5 met en évidence la façon la plus adéquate pour la fabrication des matériaux à base du chanvre en fonction de chaque utilisation.

Tableau 1.5 Exemple de dosage massique en fonction de l'utilisation [Evrard, 08]; Tiré de Chamoin (2013, p.36)

	Plafond	Enveloppe	Enduit
Chanvribat*	73 %	55 %	43 %
Tradical PF70**	10 %	23 %	36 %
Eau	17 %	22 %	21 %

(*) Granulat de chanvre pour bâtiment élaboré à partir de chènevotte conforme aux règles professionnelles d'exécutions d'ouvrage en béton de chanvre.

(**) Chaux conformes aux règles professionnelles d'exécutions d'ouvrage pour la réalisation du béton de chanvre.

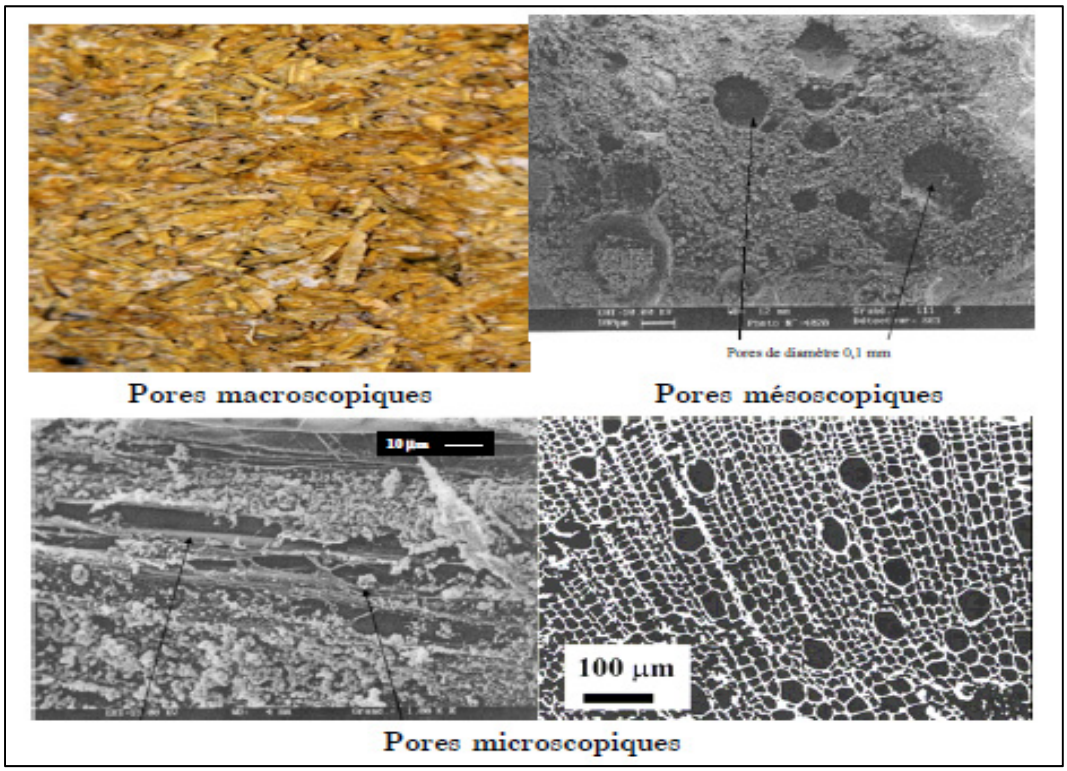


Figure 1.20 Trois classes de pores au sein du béton de chanvre [Col, 2004] Tirée de Samri (2008, p.40)

Tableau 1.6 Porosité du mortier de chanvre
Tirée de Samri (2008, p.56)

Micropores	0,01 µm
Mésopores	100µm
macropores	1 mm
Porosité totale	72 % - 79 %

La figure 1.20 et le tableau 1.6 illustrent les différentes porosités du béton de chanvre.

La porosité du béton de chanvre joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'enveloppe du bâtiment. Elle favorise l'isolation thermique par l'emprisonnement important d'air (Samri, 2008). Les avantages de leur utilisation dans la construction sont basés sur leur faible énergie grise, leur bonne résistance thermique c'est à dire leur faible conductivité thermique, qui leur confère une bonne propriété isolante. Ce matériau représente une solution pour la rénovation des bâtiments anciens et pour la nouvelle construction. Il est renouvelable, naturel, recyclable, biodégradable et fixateur de CO_2.

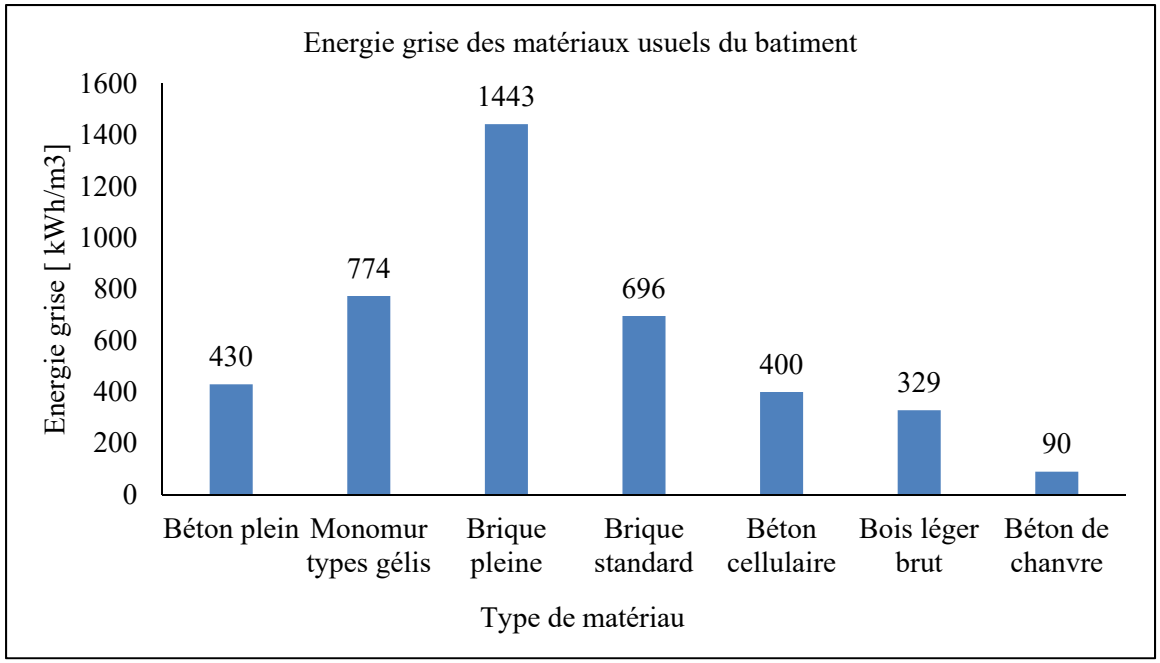


Figure 1.21 Valeur d'énergie grise pour les matériaux couramment utilisés dans le bâtiment; Tiré de Niyigena (2016, p.21)

Comme l'indique la figure 1.21, le béton de chanvre est un matériau moins énergivore tant pour la fabrication que pour l'utilisation. En comparaison avec les autres matériaux de construction figurant sur la figure, le béton de chanvre possède une très faible énergie grise, 90kWh/m^3 d'énergie grise contre la brique pleine avec 1443 kWh/m^3.

Étant un matériau non porteur, il est utilisé comme matériau de remplissage (isolant). Le béton en chanvre-chaux est utilisé généralement comme enduits isolants intérieurs et peut être appliqué en couche épaisse pour atteindre les performances hygrothermiques élevées (Mazhoud, Collet, Pretot, & Chamoin, 2016). Le béton de chanvre présente des masses volumiques à l'état sec compris entre 200 kg/m^3 et 600 kg/m^3 (Samri, 2008). Les masses volumiques présentées par la figure 1.22 sont des masses volumiques de différents bétons de chanvre formulé par (Niyigena, 2016b) pour chaque d'utilisation.

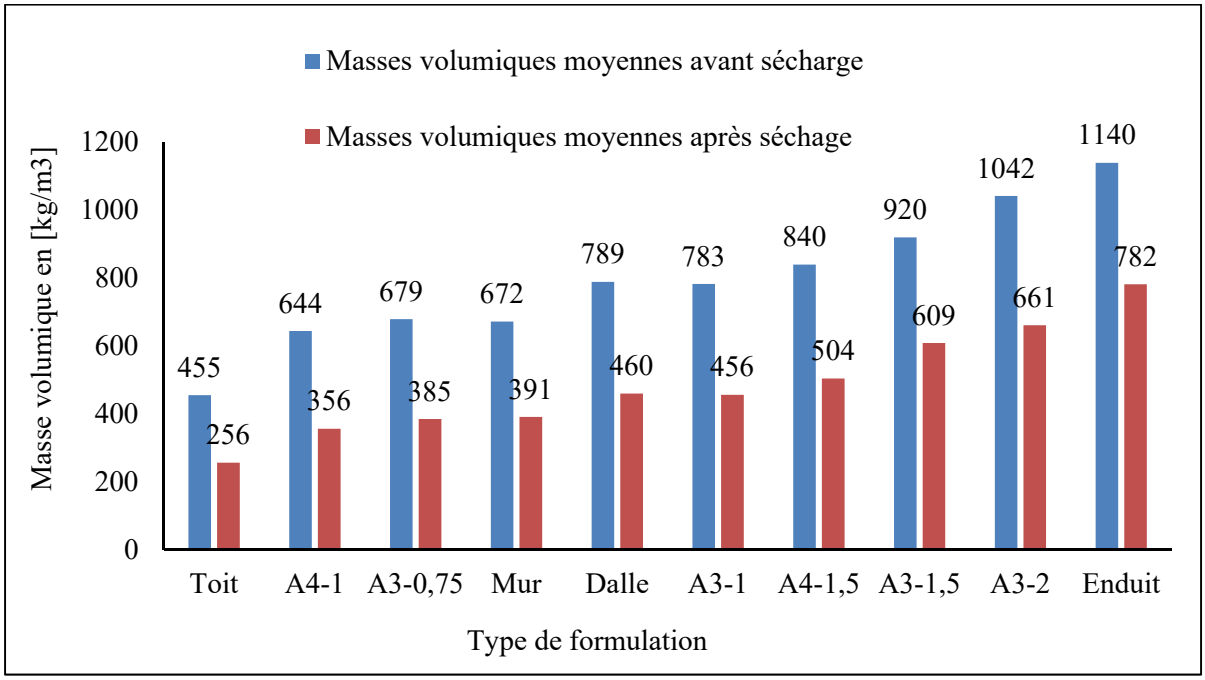


Figure 1.22 Masse volumique initiale et finale du béton de chanvre pour différentes formulations; Tirée de Niyigena (2016, p. 41)

Pour une analyse du comportement hygrothermique, les courbes d'isotherme d'adsorption/désorption sont très importantes à connaître. Sur l'axe des abscisses, les A4-1, A3-0,75, A3-1, A4-1,5, A3-1,5 et A3-2 sont les numéros de l'échantillon.

- La courbe d'isotherme d'adsorption indique la quantité d'eau contenue dans un matériau en fonction de l'humidité relative de l'air en équilibre avec le matériau. Elle permet de prévoir et de comprendre le comportement d'un matériau exposé à la variation de l'humidité du milieu extérieur sur la teneur en eau.
- La courbe d'isotherme de désorption est obtenue par la relation entre la teneur en eau à l'équilibre du matériau poreux et la désorption mesurée dans un pore. C'est le processus inverse de l'absorption. La désorption représente la différence de pression entre la pression de l'eau liquide dans un pore et la pression totale de l'air ambiant (Abelé, 2009). À partir de la relation de Kelvin, on peut déterminer la désorption par l'expression (1.3).

$$S_u = \rho_e \frac{RT}{M_v} \ln HR \tag{1.3}$$

La courbe présentée par la figure 1.23 nous fournit des informations sur la répartition de l'humidité dans le béton de chanvre et la quantité d'eau nécessaire que le béton peut absorber pour atteindre sa saturation ou atteindre son équilibre en teneur en eau à une humidité relative donnée. La différence entre la courbe d'absorption et de désorption s'appelle l'hystérésis. En général, les outils de simulations numériques disponibles commercialement, ne prennent pas en compte cet effet d'hystérésis, mais plutôt la moyenne entre l'absorption et la désorption.

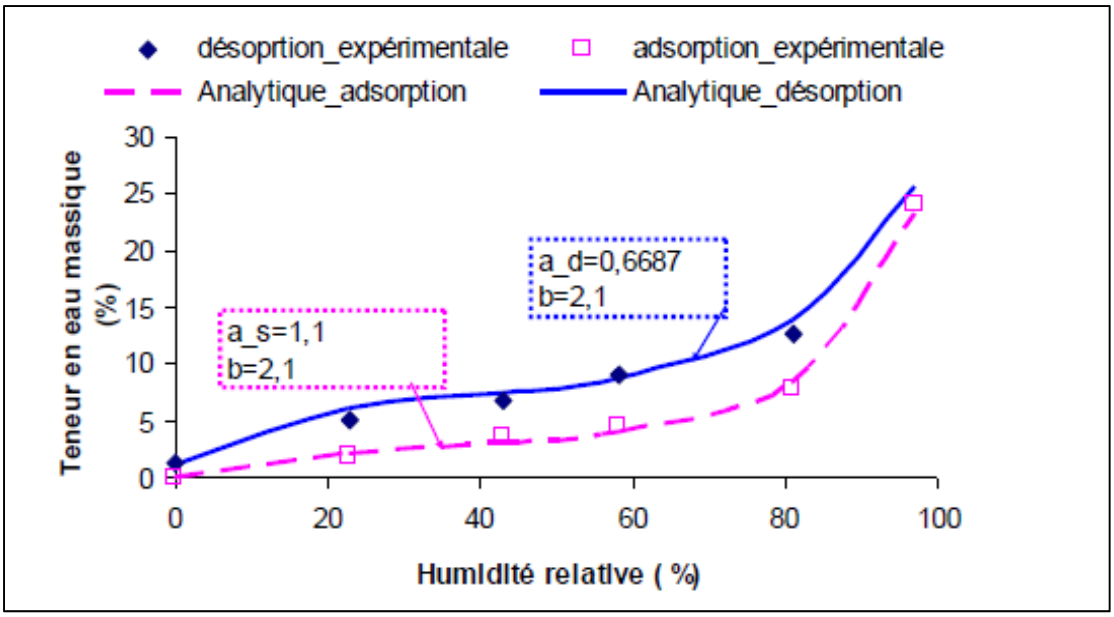


Figure 1.23 Isotherme d'adsorption-désorption expérimentale et analytique du béton de chanvre; Tirée de Tran L. Anh Dung (2010, p.43)

Les courbes d'adsorption-désorption (a) et (b) respectivement, illustrées par la figure1.24 et 1. 25 révèlent les teneurs en eau massique des particules de chanvre d'ordre de 37 % correspondant à 97 %. HR pour la figure 1.24 et de 30 % correspondant à 95 % HR pour la figure 1.25. Pour une humidité relative de 50 %, les valeurs de la teneur en eau sont respectivement de 10 % (de sorption pour a et b) et de 14 % (a), 12 % (b) (désorption). Les valeurs de la teneur en eau dépassent 10 % pour des humidités relatives supérieures à 50 %.

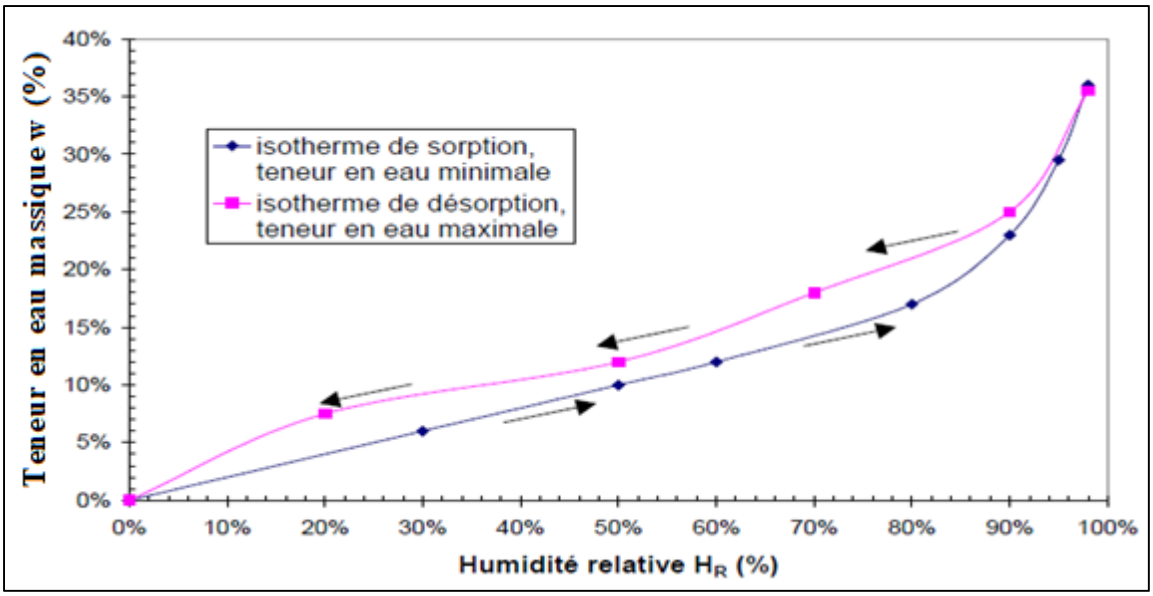


Figure 1.24 Isotherme d'adsorption-désorption des particules de chanvre à T = 20°C
Tirée de Cérézo (2005, p.67)

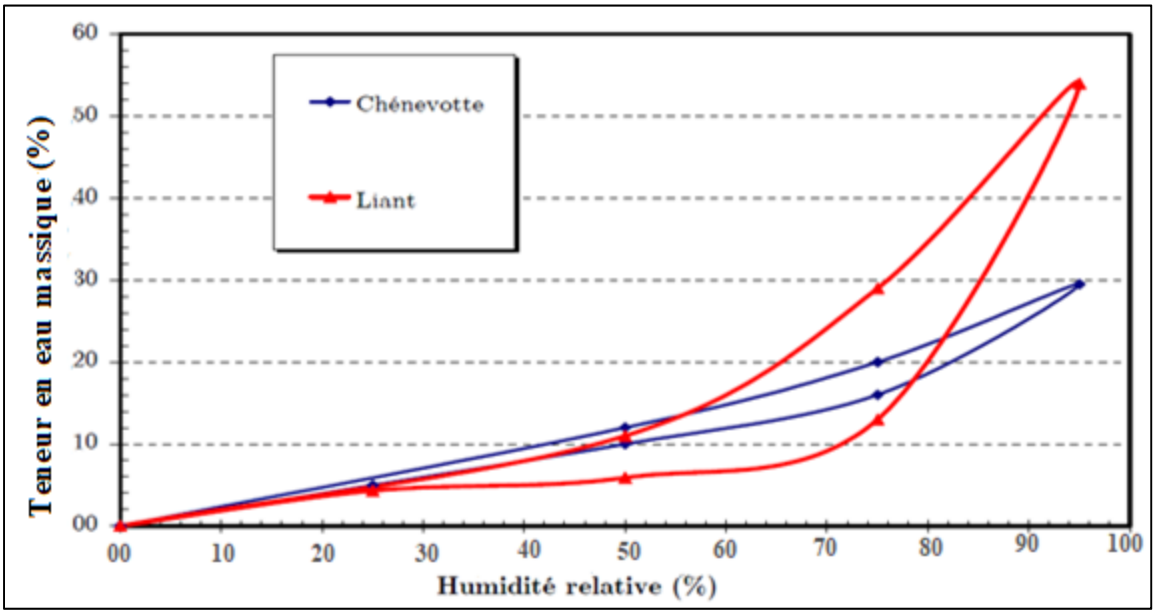


Figure 1.25 Isotherme d'adsorption-désorption du liant PF70 et chènevotte :
source (GARNIER, 2000); Tirée de Samri (2008, p.64)

Pour une étude hygrothermique complète, les courbes de désorption-adsorption du béton de chanvre et de ces particules sont importantes à connaître. En effet, le béton de chanvre présente une excellente inertie thermique, une performance d'isolation phonique excellente et des qualités de régulateur hygrométrique très remarquables selon le type d'utilisation (ARPE,

2012 ; Bayol, 2016 ; Chabot, 2010). L'utilisation de ce matériau dans la construction contribue non seulement à améliorer l'enveloppe du bâtiment en matière de confort thermique interne, mais aussi à réduire la consommation d'énergie, qui représente actuellement l'élément clé des études menées sur l'efficacité énergétique dans les bâtiments. En terme de réduction des émissions des gaz à effet de serre, un hectare de chanvre peut utiliser 15 tonnes de CO_2 avant d'arriver à maturité (Tran L. Anh Dung, 2010). Le analyse de cycle de vie du béton de chanvre montre qu'il est capable d'emmagasiner ou de capter entre 14 kgeq CO_2 et 35 kgeq CO_2 par mètre carré de murs sur 100 ans (Gauthier, 2018 ; Gourlay & Arnaud, 2011 ; Popovic, 2015 ; Rahim, Douzane, Le, Promis, & Langlet, 2016 ; Véringa, 2015). La contribution d'un bâtiment à ossature de bois isolé par le béton de chanvre à la réduction de CO_2 est environ 71 %, avec 41 % pour le béton de chanvre et 30 % pour l'ossature de bois (Boisyvon, 2015). En effet, le Béton de Chanvre stocke et piège 20 tonnes de Carbone pour 100 m² de construction, ou 138 kg de CO_2 pour 1 tonne de béton de chanvre, ce qui le place parmi les meilleurs matériaux, respectueux de l'environnement (Pittau et al., 2018). Les impacts environnementaux de 1 m^2 de mur en béton de chanvre de 26 cm d'épaisseur ont été évalués dans le cadre d'une analyse du cycle de vie (ACV) évoqué dans les travaux de (Tran L. Anh Dung, 2010). Il en ressort que 1 m^2 de mur en béton et mortier de chanvre absorbe 75,7 kg de CO_2 équivalent et en émet 40,2 kg soit un bilan favorable de 35,5 kg de CO_2 équivalent (Tran L. Anh Dung, 2010). L'impact du béton de chanvre sur le changement climatique est de l'ordre de -0,35 kg CO2eq./UF/an (Tran L. Anh Dung, 2010). De ce fait, le béton de chanvre utilisé comme un isolant pour les bâtiments à ossature de bois permet d'augmenter le taux de captation du CO_2 de ces murs (Marc Chabot, 2010). La figure 1.26 met en évidence le pouvoir de captation du CO_2 par le béton de chanvre. Sur la figure 1.26, les valeurs négatives représentent les GES émissent et les valeurs positives sont les GES captés par les matériaux du bâtiment à ossature de bois isolé en béton de chanvre.

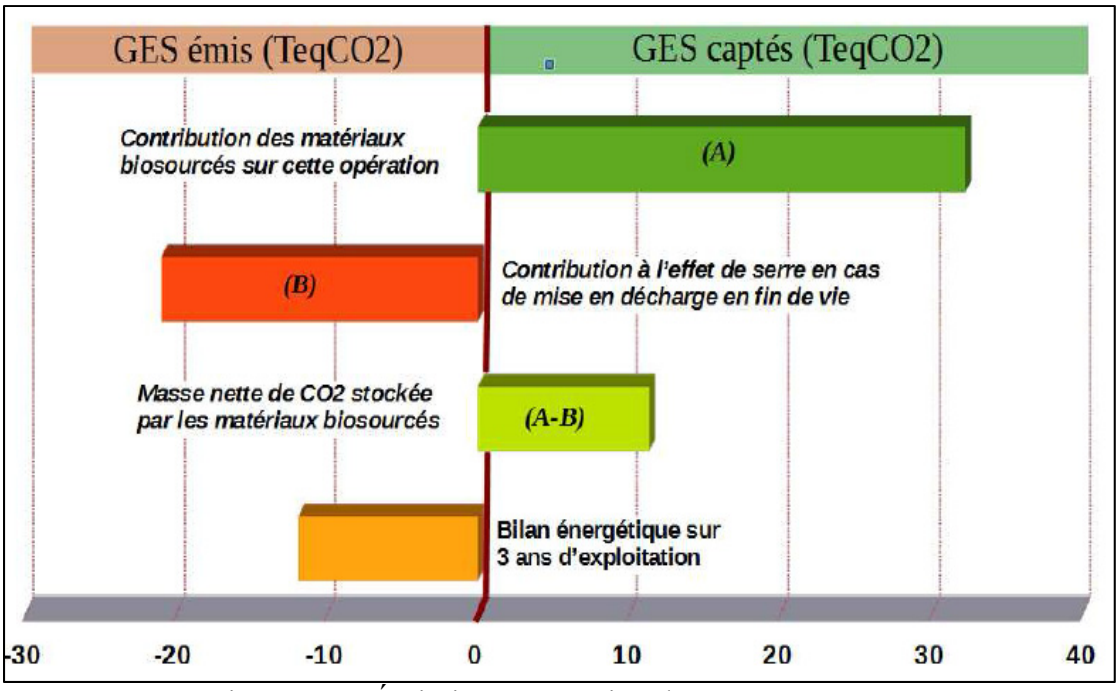


Figure 1.26 Émission et captation de CO_2 en Teq CO_2
Tirée de Boisyvon (2015, p.08)

Les matériaux à base de chanvre sont des matériaux non porteurs et aux multiples utilisations, excellents isolants thermiques et acoustiques, durables, résistants, légers, élastiques, ignifuges (Gauthier, 2018 ; Latif, Lawrence, Shea, & Walker, 2015 ; Popovic, 2015 ; Rahim et al., 2015 ; Rahim, Douzane, Le, Promis, et al., 2016 ; Véringa, 2015). Les murs en béton de chanvre présentent une capacité tampon d'humidité excellente, qui les aide à réguler l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment selon le protocole Nordest (Rahim, Douzane, Le, Promis, et al., 2016). Les bâtiments construits en béton de chanvre sont résistants à la fissuration, la moisissure et à la fissuration provoquée par la tension souvent produite dans les régions sismiques (Chabot, 2010 ; Latif, Ciupala, Tucker, Wijeyesekera, & Newport, 2015 ; Pronovost, 2017). Ils sont plus solides et donnent un meilleur confort thermique que ceux du béton ordinaire (Boisyvon, 2015; Barclay, Holcroft, & Shea, 2014 ; Eco-habitation, s.d ; Shea et al., 2012).

Les résultats d'une étude sur la température interne d'une maison construite en ossature de bois classique et en béton de chanvre à ossature bois noyée dans la région de Bordeaux en

France pour une journée typique (24 h) montrent l'utilité de l'utilisation des bétons de chanvre dans la construction (figure 1.27).

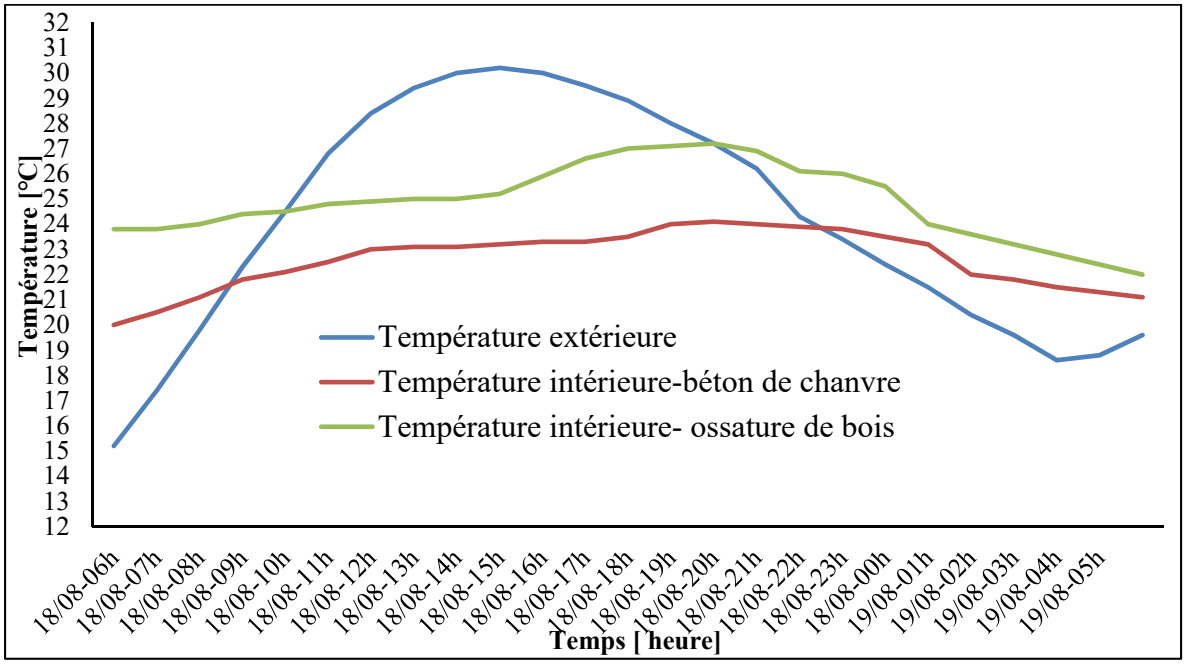


Figure 1.27 Comparaison de la température intérieure de deux bâtiments « béton de chanvre noyé » et « ossature de bois classique » en fonction de la température extérieure en été pour une journée typique (24 h); Tirée de Bayol (2016)

Nous remarquons que la température interne de la maison en béton de chanvre est entre 20 °C et 23 °C, quelle que soit la hausse de la température extérieure alors que celle de la maison à ossature de bois est de 23 °C et 27°C. En matière de confort thermique, le béton de chanvre est plus adapté au climat que l'ossature en bois classique. Selon (Bayol, 2016) : « Le béton de chanvre est le seul matériau de construction écologique, capable d'obtenir des résultats de conforts et d'économies bien plus vertueux face aux résultats de l'étude thermique dynamique ». Construire une maison en chanvre est un choix écologique et permet de faire de l'habitation un milieu sain, confortable (Gauthier, 2018). Les architectes et les concepteurs, Gervais Fortin, Antonio Di Bacco et Laurent McComber ont pris le risque d'utiliser ces matériaux dans la construction au Canada (Pronovost, 2017). L'avantage de l'utilisation des matériaux chanvre dans la construction et leur capacité à redistribuer la chaleur ou l'humidité et à équilibrer la température en hiver comme en été sont évoqués par

les concepteurs. Cependant, il n'existe pas de réglementation thermique et de label qui régissent l'utilisation du chanvre dans le code du bâtiment et il y a peu d'études sur ses propriétés en fonction du climat canadien. Les matériaux à base de chanvre ne sont donc pas reconnus comme matériau de construction. Leurs applications à la construction ne sont pas encore développées dans les pays continentaux humides et subarctiques et dans les pays africains tels que le Canada et le Burkina Faso respectivement. Les entreprises au Canada qui travaillent sur le sujet portant sur l'intégration des matériaux en chanvre dans la construction ne sont pas nombreuses. De ce fait, une étude s'impose pour confirmer sa possibilité d'être intégré dans la construction en tant que matériau de construction respectant les codes et les réglementations thermiques de la construction. La figure 1.28 illustre les différentes utilisations du béton de chanvre dans la construction.

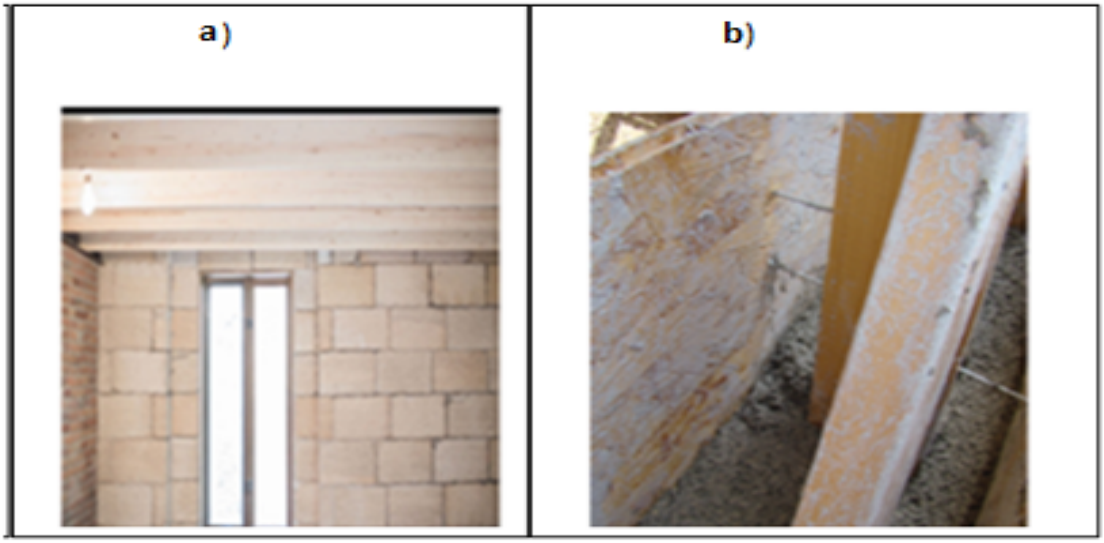


Figure 1.28 Mur en brique de chanvre (a) et mortier de chanvre projeté (b)
Tirée de Pronovost (2017)

Pour la résistance au feu, le béton de chanvre est soumis à des tests de réaction au feu par un organisme certifié Cofrac, le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE). Les essais menés selon la norme européenne EN 13501-1, en vigueur depuis 2004 classe les réactions des produits face au feu pour les applications mur, toiture et enduit, afin d'obtenir des résultats sur la sécurité de l'enveloppe. Un mur de 35 cm d'épaisseur soumis pendant 2h à un bruleur a démontré la performance du béton de chanvre lier au feu. Il en ressort de ces

essais que le béton de chanvre résiste à l'attaque prolongée des flammes tout en limitant la progression. L'enduit pratiquement incombustible (Chabannes, 2016; Sandrine & -Vasseur;, 2014; Tradical, 2016). Et l'ensemble des produits n'émettent que de très faibles fumées, sans propagation de gouttelette, ni de particule enflammée (Chabannes, 2016; Sandrine & -Vasseur;, 2014; Tradical, 2016). Du coté intérieur du béton de chanvre, la température augmente de 2℃ (journée Tradical, 2017) (Chabannes, 2016; Sandrine & -Vasseur;, 2014; Tradical, 2016). La figure 1.29 illustre l'expérience effectué par l'organisme certifié Cofrac, le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) sur la réaction au feu du béton de chanvre.

Figure 1.29 : Béton de chanvre en contacte d'un bruleur
Tirée de Tradical, 2016

1.5 Utilité des outils de simulation

La modélisation par simulation présente un avantage par rapport à un test dans la rapidité d'exécution et le coût, en revanche il ne remplace jamais l'expérimentation. Cependant, les deux approches à évaluer une enveloppe de bâtiment sont complémentaires. On a besoin d'intrants dans la simulation comme les propriétés hygrothermiques des matériaux, les données climatiques, etc. Plus on a de l'information précise, plus les calculs et l'analyse sont précis et proches de la réalité. Les outils de calculs sont des outils de comparaison et de prédiction. La simulation numérique est une méthode d'analyse très importante qui permet de vérifier plus rapidement, d'avoir un aperçu des performances avant même faire le test, communiquer et comprendre un phénomène qui se produit dans un système réel dont la réalisation des études expérimentales est souvent longue et couteuse ou parfois impossible ou compliquée.

Actuellement, dans l'ensemble des disciplines, la modélisation par simulation numérique s'est beaucoup développée et les ordinateurs sont de plus en plus performants. Cela a permis d'obtenir des solutions utiles et claires concernant les systèmes complexes. L'une des principales utilités de la modélisation par simulation est sa capacité à fournir des informations aux utilisateurs concernant la conception d'un système réel avant que celui-ci ne soit construit (Cheng et al., 2014). Il permet également d'évaluer le comportement et les interactions de tous les composants d'un système (Cheng et al., 2014 ; Clark & Daigle, 1997 ; Goldstein, Leisten, Stark, & Tickle, 2005).

Dans le domaine de la construction, l'idée de réduire la consommation énergétique, qui contribue indirectement à la réduction de l'émission de GES est devenue de plus en plus importante du point de vue des engagements pris par les différents gouvernements. Les majeures parties des outils de simulation utilisées dans le domaine du bâtiment sont des outils destinés à la prédiction de la consommation énergétique, des risques de condensation de l'humidité et de transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment. Ces outils de simulation permettent également de vérifier la capacité des nouveaux matériaux de

construction à respecter les limites proposées par les codes du bâtiment. L'amélioration de ces outils de simulation a permis de résoudre de nombreux problèmes liés au transfert couplé de chaleur et d'humidité dans les parois du bâtiment ainsi qu'aux divers problèmes de confort thermique. De ce fait, plusieurs programmes de simulation tels que WUFI, hygIRC, hygIRC-C, DELPHIN 5.8 ont été développés pour résoudre de multiples problèmes concernant la thermique du bâtiment. Le logiciel WUFI est un outil de simulation dynamique utilisé par plusieurs chercheurs, ingénieurs, etc. pour la modélisation hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment. WUFI est l'un des seuls outils disponibles commercialement. L'outil hygIRC-C est un outil très performant basée sur une plateforme COMSOL-multi physiques le plus complet et validé, mais malheureusement pas disponible commercialement (Maref & Mukhopadhyaya, 2003). Les limites évoquées par chaque auteur sont le manque des propriétés hygrothermiques des matériaux nécessaire pour son exploitation (Hartwig M Künzel, 1995 ; Maref, 2007, Sanders et al., 2014 ; Stephen McNeil, 2017 ; Theresa Weston, Ernest Kortschak, & Maria Spinu, 2017). La connaissance du phénomène physique du système d'étude, de la procédure de calcul et de la vérification de validité des données d'entrées est très importante pour l'utilisation du logiciel WUFI (Knarud & Geving, 2017 ; Krus, Theuerkorn, GroBkinsky, & Kunzel, 2014 ; Hartwig M Künzel, 1995). En effet, les raisons des modélisations par simulation sont toutefois diverses : déterminer les causes des problèmes liés à l'inconfort, à l'apparition des moisissures, aux consommations d'énergie excessive et optimiser le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiments.

Conclusion de la revue de la littérature

Les matériaux à base de fibres ont un faible impact environnemental, et sont moins énergivores, biodégradables, renouvelables et abondants. L'utilisation de ces matériaux dans la construction permet la limitation de l'utilisation des matériaux non renouvelables et de l'émission de GES. En plus du bois utilisé dans la construction en Amérique du Nord, d'autres matériaux naturels sont disponibles, qui ont des caractéristiques importantes pour compléter le bois. Pour intégrer ces matériaux dans la construction, une étude du comportement hygrothermique doit être faite en fonction du climat en utilisant l'outil de

simulation WUFI Pro 6.2. C'est l'outil de calcul disponible sur le marché et le plus utilisé et le plus complet du point de vue de l'intégration de la physique appropriée pour évaluer les performances énergétiques et hygrothermiques de l'enveloppe de bâtiment.

Objectif principal

Le but principal de cette étude est de trouver une alternative de construction traditionnelle par l'intégration du béton de chanvre dans l'enveloppe du bâtiment. D'où notre intérêt se penche à l'étude des performances hygrothermiques du béton de chanvre en tant que matériau et surtout son intégration et son comportement hygrothermique dans le système d'enveloppe étudiée. L'étude vise à comprendre le comportement hygrothermique du béton de chanvre dans deux pays contrastés, le Canada et le Burkina Faso.

Objectifs spécifiques

De façon plus spécifique, les objectifs de ce mémoire sont repartis comme suite :

1. Analyser la possibilité d'intégrer le béton de chanvre dans la structure du bâtiment dans la région de Montréal, au Canada en tenant compte des codes établis pour les bâtiments résidentiels ;
2. Analyser la possibilité d'intégrer le béton de chanvre dans la structure du bâtiment moderne dans la région de Dori au Burkina Faso ;
3. Analyser le comportement hygrothermique (température intérieure en été et en hiver, humidité relative, teneur en eau de l'ensemble de murs et pour chaque élément du mur) en utilisant l'outil de simulation WUFI Pro 6.2 ;
4. Analyser la consommation énergétique en chauffage et en refroidissement pour un bâtiment construit en béton de chanvre et en brique de terre cuite comprimée pour la région de Dori et en béton de chanvre pour la région de Montréal ;
5. Comparer les résultats des trois types d'enveloppes pour déterminer celui qui convient le mieux à la région de Dori. Comparer les résultats du mur en béton de chanvre à ceux de la construction standard pour la région de Montréal.

CHAPITRE 2

CODES DES BÂTIMENTS ET CONSTRUCTION AU CANADA ET AU BURKINA FASO

La construction des bâtiments est appréhendée par des différents codes et réglementations appliquées dans la construction de chaque pays et même de chaque région. Au Canada, la construction est un domaine fortement réglementé. Chaque province et territoire possèdent ses propres lois et réglementations de construction pour le respect des conditions climatiques et géographiques. Ces lois et réglementations imposent des exigences minimales pour atteindre les objectifs de sécurités, de salubrité et de la durabilité des bâtiments avant sa construction. Au Burkina Faso, les codes de construction ne sont pas pris en compte dans diverses constructions. Chaque bâtiment est construit en fonction des besoins du propriétaire.

2.1 Codes et construction des bâtiments au Canada et au Québec

Les codes ou réglementations de construction permettent à une municipalité de contrôler la qualité, la durabilité et le caractère sécuritaire de la structure du bâtiment en régissant la nature des matériaux autorisés et la façon de les assembler. La réglementation de la construction a pour rôle d'assurer la protection des bâtiments contre :

- La condensation d'humidité dans les murs;
- Les incendies en imposant de murs coupe-feu à tout bâtiment;
- Les bruits extérieurs.

2.1.1 Codes de constructions

Il existe plusieurs documents publiés par divers organismes pour guider les concepteurs au Canada dans la procédure de la construction des bâtiments résidentiels ainsi que les bâtiments industriels. Ces documents sont soit des normes, des procédures normalisées ou des certifications dans lesquelles les objectifs de performances et les exigences pour les

bâtiments sont bien détaillés. Les divers codes de constructions sont publiés par le Conseil national de recherche du Canada (CNRC) pour le compte de la commission Canadien. Parmi ces codes, nous pouvons énumérer :

- Le code national du bâtiment (CNB) établi pour mieux contrôler la pénétration de la pluie battante, des mouvements d'air, de la chaleur et d'humidité;
- Le code national du bâtiment (CNB) établi pour mieux contrôler la pénétration de la pluie battante, des mouvements d'air, de la chaleur et d'humidité;
- Le code national de prévention des incendies (CNPI);
- Le code national de la plomberie (CNP) qui donne des directives sur la manière de la conception et de l'installation de plomberie dans les bâtiments;
- Le code national de l'énergie pour les bâtiments (CNEB), un code établi uniquement pour la construction des bâtiments exoénergétiques.

En plus de ces codes viennent les normes et les procédures pour la construction. L'application des normes dans la construction est obligatoire au Canada, surtout les normes énumérées dans les réglementations et dans les codes de construction. Les normes sont élaborées par quatre organismes accrédités par le conseil canadien des normes (CCN). Ces organisations sont les suivantes :

- L'association canadienne de normalisation (ACN);
- L'office national des normes du Canada (ONGC);
- Les laboratoires des assureurs du Canada (ULC);
- Le bureau de normalisation du Québec (BNQ).

En plus de ces quatre organismes, d'autres normes sont traitées par le CNB telles que :

- American society for testing and material (ASTM);
- American society of heating, refrigerating and air-conditioning Engineer (ASHRAE);
- Organisation internationale de normalisation (ISO) ;
- Centre canadien de matériaux de construction (CCMC) ;
- Et plus.

2.1.2 Bâtiments résidentiels

L'énergie que nous utilisons pour alimenter, chauffer, climatiser et faire fonctionner les appareils électriques de nos maisons est à l'origine des émissions de GES. Au Canada, pour éviter la consommation excessive et participer à la réduction des émissions de GES, les codes et les réglementations établis sont appliqués lors de la construction. Le tableau 2.1 illustre la résistance thermique effective pour chaque partie de l'enveloppe du bâtiment. La résistance thermique effective de chaque partie de l'enveloppe doit être conforme aux normes énergétiques minimales en vigueur (Filion & Garon, 2013 ; Régie du bâtiment du Québec, 2012). Le gouvernement du Québec établit que la cible de la révision consiste à rehausser la performance énergétique minimale réglementaire de 20 % à 25 % par rapport à celle prévue dans la réglementation actuelle (REENB) (Ciarlo, Lalande, & Ste-Cyr, 2008).

Tableau 2.1 Réglementation énergétique pour les nouveaux bâtiments (remplace le REENBQ) prévue pour 2017; Tirée de Ciarlo, Lalande, & Ste-Cyr (2008, p.8)

Valeurs de résistance thermique effective minimales proposées RSI eff en [m^2.K/W]						
Ensemble de construction opaque hors-sol	CNEB modifié QC				Actuellement (REENB)	
	< 6000DJC**		> 6000 DJC		5000 à 5999 DJC	
Murs*	3,6	R -20,4	4,05	R-23	2,38	R -13,5
Toits*	5,46	R-31	6,17	R-35	3,1	R -17,6
Planchers exposés*	5,46	R-31	6,17	R-35	2,2	R -12,5

(*) Valeurs 25 % plus élevées lorsque l'ensemble de construction comporte des câbles chauffants.

(**) Réglementation énergétique applicable dans la région de Québec, donc à Montréal.

La figure 2.1 illustre les nouvelles exigences proposées par le code de construction du Québec (CCQ) pour favoriser l'efficacité énergétique dans la construction au Québec. Ces exigences sont mises en vigueur depuis le 30 août 2012 (Filion & Garon, 2013). La résistance thermique de chaque élément du bâtiment pour chaque ville est choisie en fonction du nombre de degrés-jours. Plus le nombre de degrés-jour est élevé, plus la valeur de la

résistance thermique est importante. Par définition, le degré-jour correspond à la situation ou la température moyenne est inférieure à la température de référence qui est de 18°C. Il indique les besoins en chauffage en fonction de la température moyenne d'un jour par rapport à une température de référence (18°C, température extérieure). Plus le nombre de degrés-jours est grand, plus les besoins en chauffage sont importants.

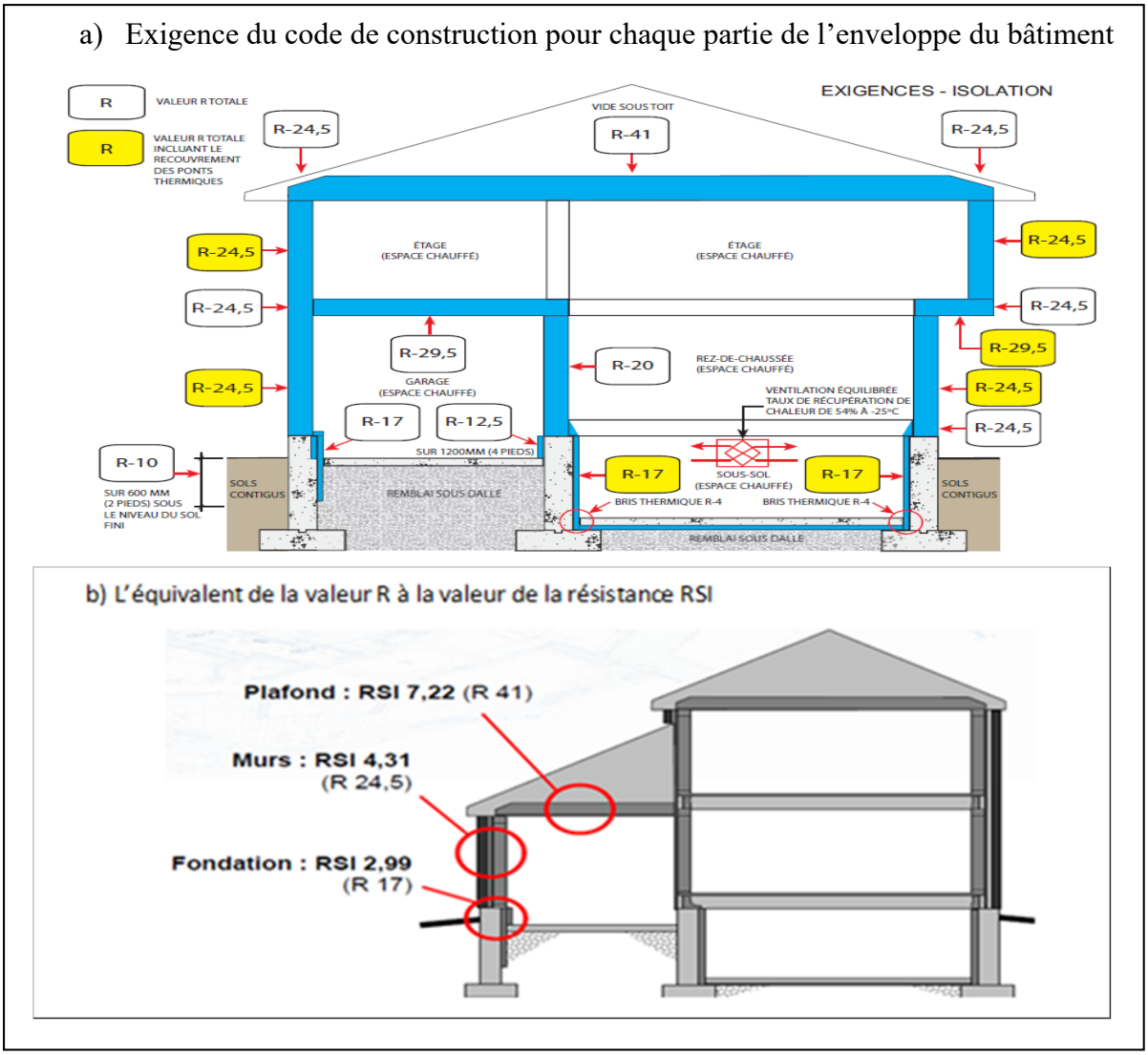


Figure 2.1 Valeurs de la résistance thermique totale de chaque partie du bâtiment exigé par le code de construction du Québec
Tirée de Filion & Garon (2013, p.20) et du Régie du bâtiment du Québec (2012, p.98)

Les exigences illustrées par la figure 2.1 sont valables pour les bâtiments situés dans les municipalités dont le nombre de degrés-jour sous 18 ℃ est de moins de 6000 (Filion & Garon, 2013 ; Régie du bâtiment du Québec, 2012). Le tableau 2.2 résume les valeurs de RSI et de R exigées pour les nouveaux bâtiments, maison Novoclimat et la nouvelle réglementation. Le tableau 2.3 montre les valeurs des résistances thermiques pour chaque partie des bâtiments situés dans les villes dont le nombre de degrés-jours sous 18 ℃ est d'au moins 6000 et le tableau 2.4 illustre le rapport entre la valeur de la résistance thermique extérieure et celle de la résistance thermique intérieure.

Tableau 2.2 Valeurs RSI et R exigées pour les nouveaux bâtiments, des maisons Novoclimat et la nouvelle réglementation (partie 11) [1] et la transmission thermique
Tiré de Régie du bâtiment du Québec (2012, p.11)

Composantes exposées	Loi sur l'économie d'énergie dans les nouveaux batiments[1]			Maison Novoclimat			Nouvelle réglementation (partie 11) [1] : Efficacité énergétique du chapitre Bâtiment du CCQ		
	RSI	R	U	RSI	R	U	RSI	R	U
Toit	5,3	30,1	0,189	7,22	41	0,138	7,22	41	0,138
Murs hors sol	3,4	19,3	0,294	4,31*	24,5*	0,232	4,31*	24,5*	0,232
Murs de fondation	2,2	12,5	0,454	2,99*	17*	0,334	2,99*	17*	0,334
Planchers hors sol	4,7	26,7	0,213	5,20*	29,5*	0,192	5,20*	29,5*	0,192
Plancher du sous-sol	…..	…..	…..	0,88**	5**	1,136	0,88**	5**	1,136
Dalle sur sol (au plus 600 mm au-dessous du niveau sol)	……	…..	…..	1,32	7,5	0,757	1,32	7,5	0,757

Les résistances thermiques RSI et R s'exprime en m^2 K/W et la transmission thermique U en W/m^2 K.

L'auteur défini les indices ([1]), (*) et (**) comme :

[1]Pour les bâtiments situés dans une municipalité dont le nombre de degrés-jours sous 18°C est moins de 6000.

*Cette valeur inclut un recouvrement des ponts thermiques avec un minimum de R-4 pour un espacement de 24 pouces et un R-5 pour un espacement de 16 pouces.

**peut aussi être réalisé avec un produit isolant de RSI 1,32 (R7, 5) sur 1,2 m (4 pi) au périmètre.

Tableau 2.3 Valeurs RSI et R exigés pour la nouvelle réglementation (partie 11) [2]
Tiré de Régie du bâtiment du Québec (2012, p.13)

Composante exposée	Nouvelle réglementation (partie 11) [2]		
	RSI	R	U
Toit	9	51	0,111
Murs hors sol	5,11*	29*	0,196
Murs de fondation	2,99*	17*	0,334
Planchers hors sol	5,2*	29,5*	0,192
Plancher du sous-sol	0,88**	5**	1,136
Dalle sur sol (au plus 600 mm au-dessous du niveau du sol contigu)	1,32	7,5	0,757
Étanchéité à l'air	Système d'étanchéité selon section 9.25		

*Cette valeur inclut un recouvrement des ponts thermiques.

**peut aussi être réalisé avec un produit isolant de RSI 1,32 (R7, 5) sur 1,2 m (4 pi) au périmètre.

([2]) pour les bâtiments situés dans une municipalité de nombre de degrés-jours sous 18°C d'au moins 6000.

Tableau 2.4 Tableau 9.25.1.2 faisant partie intégrante de l'article 9.25.1.2.
Tiré de Régie du bâtiment du Québec (2012, p.47)

Degrés-jours de chauffage de l'emplacement ([1]) du bâtiment, en *C-jours	Rapport minimal entre la résistance thermique totale du côté extérieur et la résistance thermique totale du côté intérieur de la face interne du matériau
≤ 4999	0,2
5000 à 5999	0,3
6000 à 6999	0,35
7000 à 7999	0,4
8000 à 8999	0,5
9000 à9999	0,55
10 000 à 10 999	0,6
11 000 à 11 999	0,66
≥ 12 000	0,75

Tableau 2.5 Degrés-jours sous 18°C de quelques villes de Canada
Tiré de Régie du bâtiment du Québec (2012, p.38)

Ville	Degrés-jours	Ville	Degrés-jours
Drummondville	≤ 4999	Baie-Comeau	6000 à 6999
Hull		Havre-Saint-Pierre	
Montréal		Port-Cartier	
Sherbrooke		Rouyn-Noranda	
Trois-Rivières		Sept-Îles	
Alma	5000 à 5999	Gagnon	7000 à 7999
Chicoutimi		Kuujjuaq	8000 à 8999
Gaspé		Inukjuak	9000 à 9999
Rimouski		Povungnituk	
Saint-Jérôme			
Thetford Mines			

Lorsqu'on observe le tableau 2.5, on constate que la ville de Montréal fait partir des villes ayant un degré-jours inférieur à 5000. Lorsque l'étanchéité est bien établie et le mur bien isolé, la demande en chauffage pour la ville de Montréal est plus faible que la majorité des villes du Canada.

2.1.3 Étanchéité à l'air

Pour garantir le confort des occupants en économisant de l'énergie dans le bâtiment, il est nécessaire que ce bâtiment soit bien isolé (Maref W., 2018). Cependant, une isolation thermique performante ne peut être garantie sans une bonne étanchéité à l'air (Puymbroeck & Janssen, 2012). L'étanchéité à l'air caractérise l'ensemble des fuites d'air involontaire, c'est la résistance d'un bâtiment face aux fuites d'air (Maref. et al., 2011). Le contrôle d'étanchéité à l'air est un élément important pour le bon fonctionnement d'un bâtiment (Maref et al., s.d; Maref., s.d; Maref., Armstrong., et al., 2011; Maref. & Saber., 2011). En plus d'offrir des conditions ambiantes favorables aux occupants, il permet de contrer les problèmes de condensation dus au mouvement d'air dans les parois et cavités (Maref. et al., 2011; Lenardo, Maref, & Saber, 2011; Maref W., 2011; Maref., Armstrong., et al., 2011)). En effet, un bâtiment est étanche à l'air lorsque son enveloppe permet d'éliminer toutes les pertes de chaleur dues aux fuites d'air chaud vers l'extérieur en hiver ainsi que les gains de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur en été (Ademe, Bourgogne, Alsace, Franche-Comité, & Loire, 2012). Pour qu'un bâtiment soit étanche à l'air, plusieurs étapes doivent être prises en compte lors de la construction (figure 2.2).

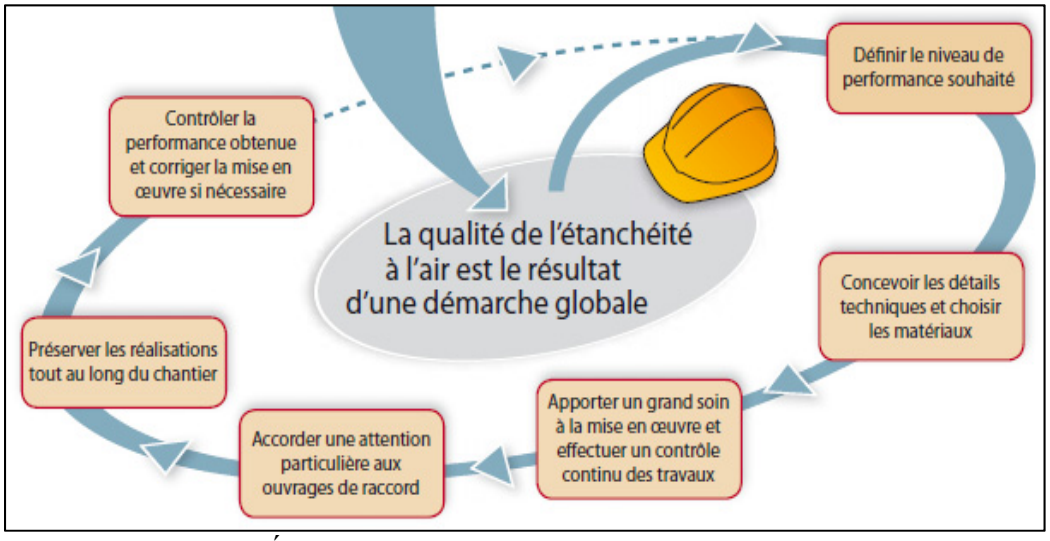


Figure 2.2 Étapes à suivre pour un bâtiment plus étanche à l'air
Tirée de Le Forem et Cifful, Ifapme, Cstcbe, & Wallonne, (2013, p.04)

La continuité de l'étanchéité à l'air (le pare-air) entre les différents matériaux de l'enveloppe du bâtiment est très importante. Les parties du bâtiment les plus importantes et délicates à réaliser sont les raccordements entre les parois et les jonctions ainsi que tous autres éléments qui les traversent (Maref et al., s.d; Maref., s.d; Maref., Armstrong., et al., 2011; Maref. & Saber., 2011). Ces parties sont le toit et les planchers, les passages des tuyauteries d'égout, d'eau chaude, la ventilation et les câbles électriques ainsi que les ouvertures vers l'extérieur (les portes, les fenêtres, l'évacuation d'air vicié) (Le Forem et Cifful, Ifapme, Cstcbe, & Wallonne, 2013 ; Puymbroeck & Janssen, 2012).

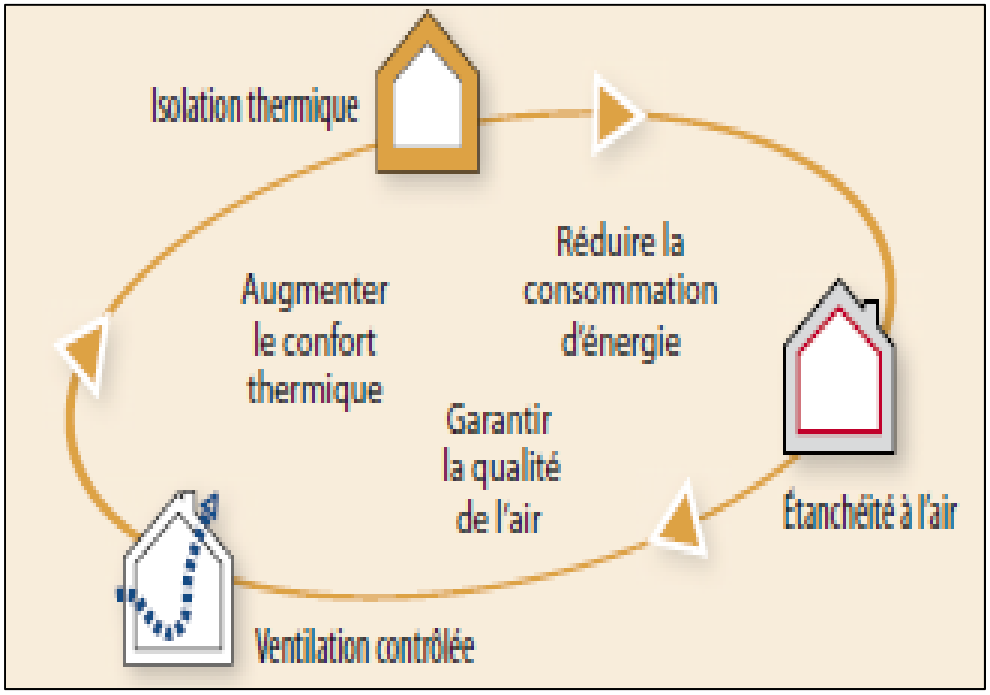


Figure 2.3 Importance de l'étanchéité à l'air
Tirée de Le Forem et Cifful, Ifapme, Cstcbe, & Wallonne, (2013, p.04)

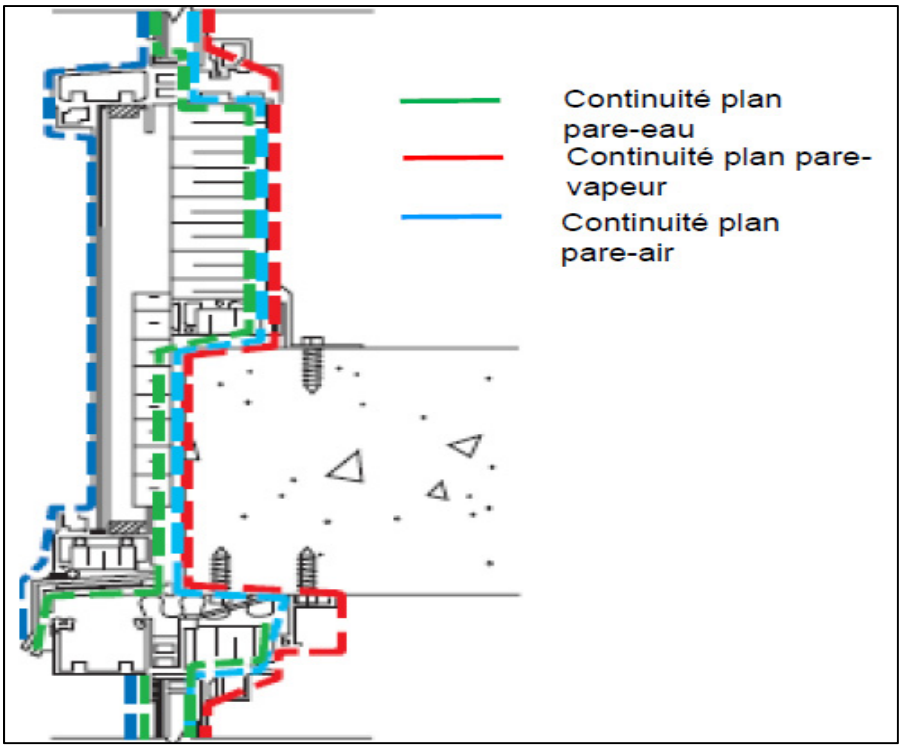


Figure 2.4 Technique de réalisation de l'étanchéité à l'air
Tirée de Salvatore Ciarlo (cours été 2018, chap.6 p.110).

La figure 2.4 montre que l'étanchéité à l'air est assurée par des pare air/vapeurs (i.e. le 6 Mil Polyéthylène) posés de manière continue. L'ensemble de la paroi représente dans certains cas l'élément d'étanchéité à l'air, surtout dans les constructions africaines. L'étanchéité à l'air peut être assurée de l'extérieur comme de l'intérieur. Dans les figures 2.3 et 2.4 l'étanchéité à l'air est assuré de l'intérieur et doit être en continuité sur la totalité des surfaces intérieures des parois. Un bâtiment très bien isolé équivaut à un bâtiment ayant une haute performance énergétique et un haut niveau de confort. Pour atteindre cette performance, l'isolant doit se trouver dans un environnement sec, sans courant d'air, sans oublier la présence d'une ventilation efficace et une récupération de chaleur dans le bâtiment (ADEME et al., 2012).

2.2 Construction au Burkina Faso

Le Burkina Faso est un pays enclavé situé en Afrique de l'ouest, possédant un climat aride. La majorité de la construction au Burkina Faso est basée sur les besoins de l'occupant et non sur des réglementations.

2.2.1 Condition climatique

Le Burkina Faso possède deux types de climats, la saison sèche (novembre à mai) caractérisée par la présence de l'harmattan (vent très chaud accompagné d'une chaleur importante) et une saison des pluies qui s'étend de juin à octobre. Dans cette étude, il est question d'étude la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment lié à la variation de la température extérieure. Les figures 2.5 et 2.6 illustrent un aperçu de la variation de la température extérieure de trois (03) années (2014 à 2016) de la ville de Dori. La figure 2.6 a été établie pour mieux voir la variation de la température pour chaque mois de ces trois (03) années.

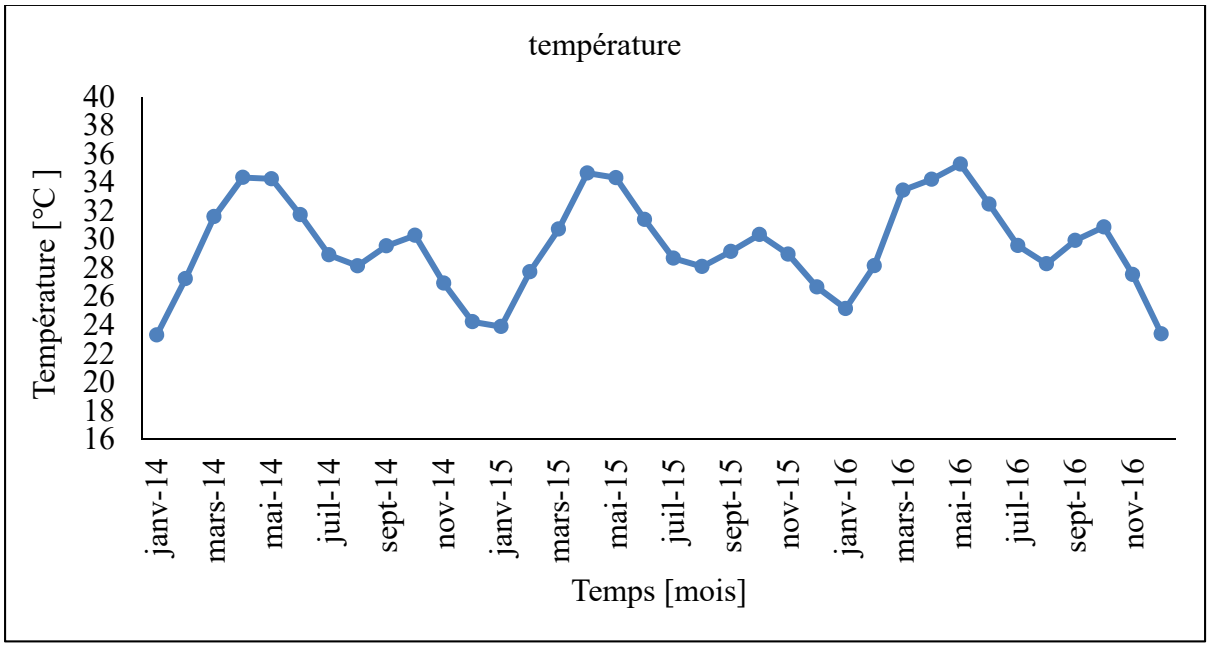


Figure 2.5 Variation des températures extérieures des années 2014-2016 de la ville de Dori

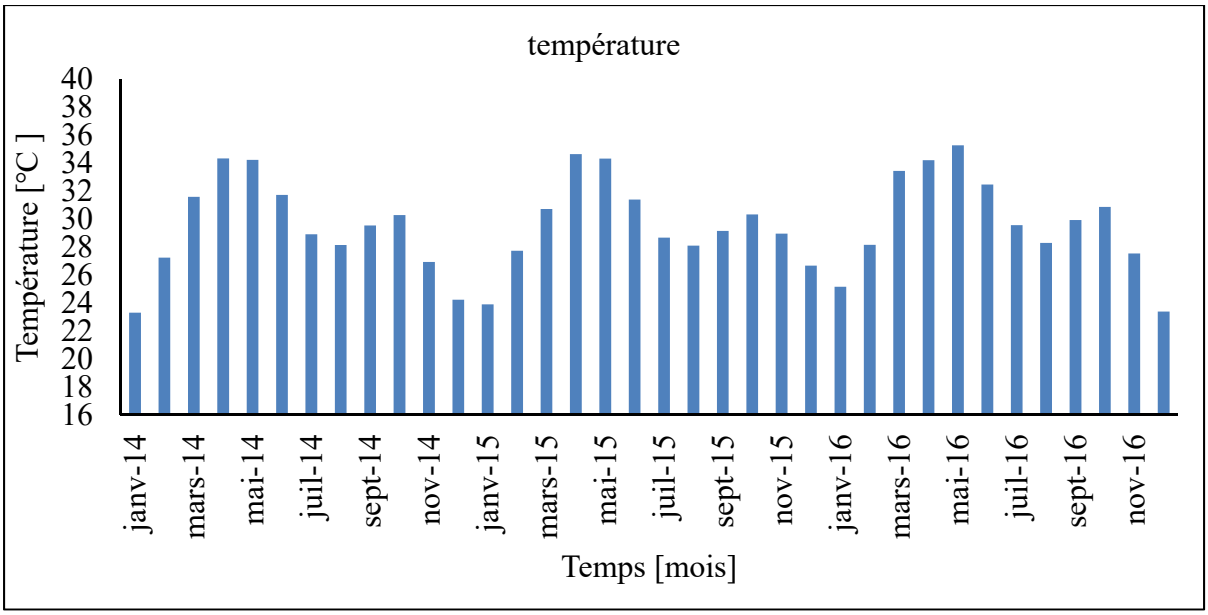


Figure 2.6 Histogramme des températures moyennes mensuels

Lorsqu'on observe la figure 2.6, on constate que la ville de Dori présente des températures très élevées c'est-à-dire plus de 27°C en moyenne mensuelle pour les mois de février à novembre et moins de 27°C pour les mois de décembre à janvier. Les données de la température de ces trois (03) années seront utilisées pour la simulation numérique avec le logiciel WUFI Pro 6.2. Par manque de données de l'humidité relative, l'étude est concentrée sur la capacité du béton de chanvre à réguler la température pour la ville de Dori.

2.2.2 Matériaux majoritaires utilisés dans la construction

Il en ressort que le secteur du bâtiment est l'un des plus dynamiques au Burkina Faso. La demande des matériaux de construction est de plus en plus cruciale. De ce fait, le pays dépend fortement de l'extérieur, car la quasi-totalité des produits finis ou matières premières utilisés dans la construction est issue de l'importation. Le ciment est le matériau de construction le plus utilisé en milieu urbain et rural. 65 % de la population burkinabè optent pour la construction en parpaing de ciment, 18 % en bloc de latérite taillée, 13 % en brique de terre comprimée et 4 % en adobe (terre) (Wyss & coopération, 2005). Tandis que la

production du ciment, le broyage est réalisé par quatre cimenteries (Cimaf, Cimfaso, Diamond Ciment et CimBurkina) à Ouagadougou dont la matière première, le clinker est en totalité importée (Bationo, 2015). Cependant, le pays regorge d'un énorme potentiel de calcaire pour la production du ciment en une grande quantité ainsi que d'autres divers matériaux pouvant être utilisés pour la satisfaction de la demande.

2.2.3 Matériaux disponibles nécessaires pour la construction au Burkina Faso

Selon les types de sols du Burkina, le pays regorge de la matière d'origine naturelle pour la production locale de matériaux de construction. La majeure partie du pays est le domaine des plateaux latéritiques. Les trois quarts du sol sont des reliefs plus accidentés avec des dépôts superficiels (Sosthène, 2006). Au sud-ouest et à l'ouest se dressent des roches sédimentaires détritiques (en débris de matière organique) et granitiques constituant une zone regorgeant de granite, latérite, de grès de bonne qualité pour les matériaux locaux de construction sauf la partie nord du pays où le socle est couvert de dunes de sable (figure 2.9).

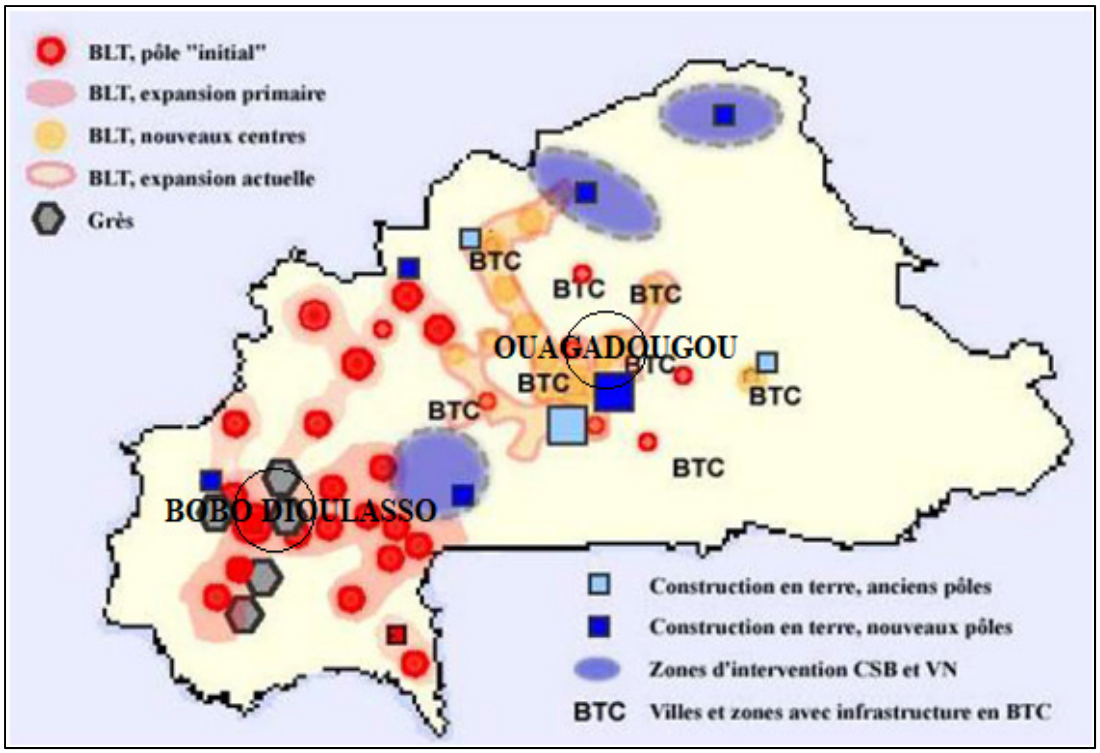


Figure 2.7 Zones et pôles d'utilisation des matériaux et techniques appropriés, Observations sur le terrain, Wyss, (2005, p 75).

L'adobe est une brique mêlée de paille et séchée au soleil généralement appelée brique de banco (terre crue). Il couvre presque toute la superficie du Burkina, sauf la région du Grand Nord (le sahel). Actuellement, certains organismes et associations (construction sans bois : CNB ; Voûte Nubienne : VN) encouragent la construction en terre dans cette région où les populations ont pour coutume la construction de type nomade (Granier & Youlou, 2014).

L'adobéton est une technique qui a été mise au point pour résoudre les aspects suivants :

- Construire en terre et résoudre en partie les coûts excessivement élevés des matériaux importés (ciment, fer à béton...) ;
- Assurer une parfaite protection du matériau terre contre l'impact des eaux de pluie source, de mauvaise durabilité ;
- Donner un aspect psychologique acceptable du matériau issu de la terre.

L'adobéton est défini comme une technique de construction mixte d'éléments porteurs en adobe (terre) et d'éléments protecteurs en écaille préfabriquée en béton de ciment qui se fixe

sur le côté extérieur du mur pour augmenter l'imperméabilité et la durabilité de l'adobe dans (Abderrahman Nouda, 1992 ; Martin, 1998). Cette technique de construction est utilisée dans les années 90 (Michel Martin, 1998). La consommation de ciment est d'environ 15 kg par mètre carré de surface murale (Abderrahman Nouda, 1992). C'est une technique relativement difficile, car il faut des procédés maîtrisés pour assurer la cohésion entre l'élément porteur et l'élément protecteur (Abderrahman Nouda, 1992). Pour améliorer l'isolation thermique, de la paille peut être ajoutée à la terre des adobétons.

La production des briques de terre comprimée est localisée principalement dans le centre du Burkina Faso (Figure 2.9). Les villes avec quelques infrastructures en brique de terre comprimée (BTC) sont : Fada N'gourma, Kaya, Koudougou, Tenkodogo, Ouahigouya, Kongoussi et la zone de Ouagadougou. Dans ces villes, on retrouve des Petites et Moyennes Entreprises (PME) de production de BTC (Sosthène, 2006). Leur site de production se trouve généralement en ville ou à la périphérie de la ville, mais leur carrière d'exploitation de matière première est souvent à quelques kilomètres de la ville (Sosthène, 2006). Présent dans le paysage architectural du Burkina Faso, la production des blocs de latérite taillée (BLT) a initialement commencé dans la région de Bobo-Dioulasso sous le régime colonial (Sosthène, 2006 ; Wyss & coopération, 2005). À cette époque, le travail se faisait par régime de travaux forcés. Actuellement, l'ouverture des carrières se fait un peu partout dans le pays où la pierre est connue par la population. La carrière de l'ouest est la première zone qui a le potentiel naturel en latérite. Le nord, le Centre et l'est du Burkina sont aujourd'hui des zones d'expansion de taille manuelle de BLT (Wyss & coopération, 2005). De la même manière que le BLT, la production de la pierre taillée ou grès a commencée dans la région de Bobo-Dioulasso. Les gisements de grès existent autour de Bobo-Dioulasso. L'ouest du Burkina reste la principale zone de production de la pierre taillée. Toutes ces informations montrent que les matériaux locaux de construction sont disponibles presque dans toutes les zones du Burkina Faso et quelques exemples de construction sont illustrés par la figure 2.10.

a-Parpaing en ciment p.16

b-Adobe (enduit en terre crue) p.52

c- Brique de terre comprimée p.30

d- Bloc de latérite taillé p.66

e- En grés p.32

f- Habitat F3 en Bloc de latérite taillé p.18

g- Cathédrale de Koudougou, murs en terre, parement en pierre latéritique p.28

Figure 2.8 Différents types de construction au Burkina Faso
Tirée de Wyss, (2005)

Conclusion partielle

La construction est un domaine qui s'améliore au fil des années par l'intégration des nouveaux materiaux dans la structure du bâtiment. Le respect de la valeur de la résistance thermique R du mur, des règlementations, des normes et des codes de construction sont obligatoires pour la construction en Amérique du Nord. Quant à la construction au Burkina Faso, c'est un domaine qui a besoin d'une grande considération. Plusieurs materiaux locaux existant au Burkina Faso peuvent être amélioré et utilisé dans la construction moderne. La construction en adobéton est une bonne technique qui doit être réintégrer dans la construction moderne. Pour ce fait une etude et une formation est nécessaire. L'établissement de norme pour chaque type de construction doit être établi tel qu'établi pour les normes du Canada.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DE L'ENVELOPPE DE BÂTIMENT ET CHOIX DE L'OUTIL DE SIMULATION

Pour faire une etude hygrothermique, le choix d'un logiciel de simulation s'impose. Le logiciel choisi pour la simulation est le logiciel WUFI Pro 6.2. Comme décrit dans le chapitre 1 au paragraphe 5, WUFI Pro 6.2 est l'un des seuls outils de simulation dynamique disponibles commercialement sur le marché et le plus complet du point de vue de l'intégration de la physique du bâtiment pour évaluer les performances énergétiques et hygrothermiques de l'enveloppe de bâtiment. Son concepteur est (Künzel, 2012). Les équations intégrer à WUFI Pro 6.2 dérivent des transferts couplés de chaleur et de masse. Ces équations sont appliquées à l'enveloppe du bâtiment et connues depuis longtemps. Elles sont utilisées pour la détermination de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment. En plus des phénomènes de transfert de chaleur, l'enveloppe du bâtiment subit d'autres phénomènes appelés transfert d'humidité. De ce fait, pour la compréhension des transferts d'humidité et les transferts couplés de chaleur et de masse qui ont lieu dans un matériau, il est important de définir les notions lieu à ces phénomènes (Lelièvre, 2015).

3.1 Transfert thermique et massique à travers une enveloppe

La thermique est une discipline scientifique de la physique qui traite les échanges thermiques tels que les transferts de la quantité de chaleur. Les propriétés thermiques des matériaux caractérisent leur comportement en présence d'échange thermique. Ils déterminent la capacité d'un matériau à gérer mouvements de chaleur.

En transfert stationnaire, les propriétés thermiques concernées sont les suivantes : conductivité thermique λ, résistance thermique R et l'émissivité thermique ε.

En transferts dynamiques : la diffusivité thermique α et l'effusivité thermique E

Pour les analyses hygrothermiques le transfert d'humidité ou transfert de masse et le transfert de chaleur dans les matériaux sont couplés. WUFI Pro 6.2 choisit comme outil de calcul pour cette étude est performant et disponible. En plus, il est utilisé en Europe et en Amérique du

Nord. Les équations qui régissent les transports couplés de chaleur et de masse pour les analyses hygrothermiques et de la consommation énergétique établies dans l'outil de calcul WUFI Pro 6.2 se basent sur le modèle de Künzel. Ces équations sont intégrées dans le logiciel WUFI Pro 6.2 et n'ont pas besoin d'être développées en détail. Ces équations sont écrites comme suit :

- **Bilan de la conservation de la chaleur**

$$\frac{\partial H}{\partial T}.\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(\lambda \nabla T) + L_v \nabla.\left(\delta_P . \nabla(H_R P_{sat})\right) \tag{3.1}$$

- **Bilan de la conservation de la masse**

$$\frac{\partial w}{\partial H_R}.\frac{\partial H_R}{\partial t} = \nabla.(D_\varphi \nabla H_R + \delta_P \nabla.(H_R P_{sat})) \tag{3.2}$$

Tableau 3.1 Définition de chaque terme des équations (3-1) et (3-2)

$\frac{\partial H}{\partial T}.\frac{\partial T}{\partial t}$	Inertie thermique
$\nabla.(\lambda \nabla T)$	Conduction thermique
$L_v \nabla.\left(\delta_P . \nabla(H_R P_{sat})\right)$	Convection liquide et convection vapeur
$\frac{\partial w}{\partial H_R}.\frac{\partial H_R}{\partial t}$	Inertie hydrique (humidité)
$\nabla.\left(D_\varphi \nabla H_R\right)$	Diffusion liquide
$\delta_P \nabla^2.(H_R P_{sat})$	Diffusion de la vapeur

Tableau 3.2 Définition des coefficients des équations (3-1) et (3-2)

H	Enthalpie Totale	H_R	Humidité Relative
T	Température	P_{sat}	Pression de vapeur saturante
L_v	Chaleur latente de vaporisation	∇	Gradient
δ_P	Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau	∇^2	Nabla carrée ou Laplacien
D_φ	Coefficient de conduction	w	Teneur en eau

3.1.1 Définition des coefficients liés à l'équation de conservation de chaleur et d'humidité

- La chaleur de vaporisation d'eau L_v représente la quantité de chaleur nécessaire pour transformer en vapeur une unité de masse d'eau dans un matériau.
- La perméabilité à la vapeur d'eau (δ_P) d'un matériau est le rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau (m_v) par unité d'épaisseur (e), de temps (t) et par unité de différence de pression de vapeur (ΔPv) régnant entre sa face extérieure et intérieure. Elle dépend du diamètre des pores du matériau concerné (Abelé, 2009) et peut être déterminée par l'expression :

$$\delta_P = \frac{m_v}{e.t.\Delta Pv} \tag{3.3}$$

$$m_v = \frac{q_v}{t}$$

q_v représente le flux de la vapeur d'eau et peut être déterminé par la courbe de la variation de la masse du matériau en fonction du temps. Deux méthodes peuvent être utilisées pour sa détermination : la méthode gravimétrique et par analyse de gaz (Abelé, 2009).

Avec t : temps en heure ;

e: épaisseur du matériau en m;

m_v : masse de la vapeur d'eau en kg

- Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau μ est le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air δ_{air} par sa propre perméabilité δ_p.

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta_p} \tag{3.4}$$

Avec $\delta_{air} = 2.10^{-7} \frac{T^{0,81}}{P_a}$ et T la température; P_a la pression ambiante

3.2 Propriétés importantes pour l'étude hygrothermique des matériaux

L'analyse du comportement hygrothermique d'un mur nécessite la connaissance des propriétés du matériau.

3.2.1 Densité à l'état sec du matériau

La densité à l'état sec ρ_{sec} d'un matériau appelé aussi masse volumique est le rapport de la masse du matériau à l'état sec m_{sec} et le volume du matériau à l'état sec V_{sec} (W=0). Elle permet de caractériser la masse du matériau par unité de volume et peut être déterminée par la formule :

$$\rho_{sec} = \frac{m_{sec}}{V_{sec}} \tag{3.5}$$

3.2.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique C d'un corps appelé aussi chaleur massique est la quantité de chaleur dont il a besoin pour que sa température d'une unité de sa masse s'élève d'un degré et s'exprime en J/ (kg. K). La densité ρ et la chaleur spécifique C d'un matériau interviennent dans la caractérisation de l'inertie de la paroi d'un bâtiment. Plus un matériau présente une densité et une chaleur spécifique importantes, plus il apporte de l'inertie à la paroi suivant

son agencement. Ils interviennent dans la détermination de la quantité de chaleur Q que peut emmagasiner une paroi.

$$Q = m\,\mathrm{C}\,\Delta T = \rho\, V\, C\, \Delta T \tag{3.6}$$

Avec m : la masse du matériau, ΔT: la variation de la température et V : le volume du matériau.

3.2.3 Inertie thermique ou masse thermique

L'inertie ou la masse thermique d'un matériau permet de réguler ou d'atténuer dans le temps la température en hiver-été ou jour-nuit (figure 3.1) comme le béton ou le coffrage isolant. L'inertie thermique représente la capacité de l'enveloppe du bâtiment à accumuler la chaleur pendant le jour et la restituer en cas de besoin, surtout la nuit. La connaissance du comportement des matériaux est un principe fondamental pour la conception des bâtiments performants. Elle contribue au confort de l'habitation en atténuant les variations de pointe de températures.

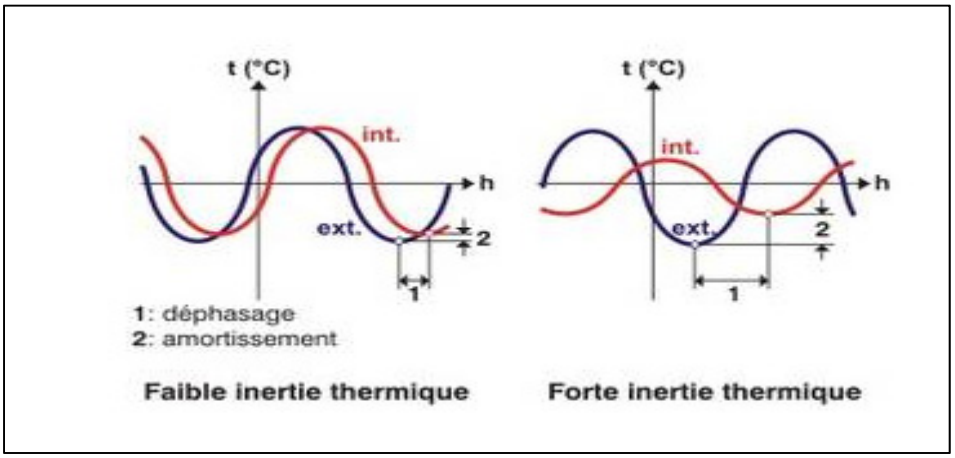


Figure 3.1 Température intérieure pour une paroi à faible et à forte inertie thermique; Tirée de Bruxelles Environnement (2010, p.1)

La diffusivité thermique a et l'effusivité thermique E sont utilisées pour la détermination de l'inertie thermique des matériaux.

- La diffusivité thermique a détermine la vitesse avec laquelle la température d'une paroi évolue en fonction des sollicitations. Plus la diffusivité est faible, plus la chaleur met du temps à traverser la paroi du bâtiment.

$$a = \frac{\lambda}{\rho C} \tag{3.7}$$

- L'effusivité E d'un matériau est sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. C'est sa capacité à réguler l'ambiance intérieure. L'effusivité caractérise la sensation de froid (grande effusivité thermique) ou de chaud (faible effusivité thermique) d'un matériau en contact avec son environnement extérieur ou intérieur.

$$E = \sqrt{\lambda\, \rho\, C} \tag{3.8}$$

La conductivité thermique λ intervient dans la détermination de la diffusivité et l'effusivité. Sa détermination est alors primordiale.

3.2.4 Conductivité thermique λ

La conductivité thermique λ est une propriété intrinsèque d'un matériau. Elle représente le flux de chaleur traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température ΔT d'un degré entre l'intérieur et l'extérieur. La valeur de la conductivité et de la résistance thermique est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant des matériaux. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est un bon isolant inversement, plus elle est élevée, le matériau est un conducteur de chaleur. Ce sont des grandeurs thermo-physiques les plus recherchées pour les matériaux de construction. La résistance thermique comme définie au chapitre I, dépend du coefficient de la conductivité thermique et de l'épaisseur du matériau e. La conductivité thermique peut être déterminée par la formule suivante :

$$\lambda = \frac{\varphi\, e}{\Delta T} \tag{3.9}$$

L'utilisation de cette formule nécessite la connaissance du flux thermique φ. Toute fois la méthode des boîtes gardées, en utilisant des fluxmètres peut être utilisée pour la détermination directe de la conductivité thermique. La méthode des boîtes est un dispositif utilisé dans les laboratoires pour déterminer simultanément la conductivité thermique et la diffusivité thermique en peu de temps en utilisant deux échantillons du matériau considéré pour l'expérience (bruxelles Environnement, 2010).

3.2.5 Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur μ

Le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ aussi appelée coefficient de diffusion de la vapeur d'eau détermine la perméabilité d'un matériau à la vapeur d'eau.
Elle intervient dans la relation de Sd qui représente l'épaisseur d'une couche d'air exerçant la même résistance à la diffusion de vapeur que l'épaisseur de la couche du matériau e .

$$Sd = \mu * e \tag{3.10}$$

3.2.6 Teneur en eau

Dans les matériaux de construction, l'eau peut se trouver sous différents états pour une condition d'humidité relative et de température données. La quantité d'eau contenue à l'intérieur d'un matériau dépend de l'humidité relative et de la température extérieure et intérieure. Par définition, la teneur eau W d'un matériau est le rapport de la masse d'eau m_e contenue dans ce matériau et de la masse du même matériau à l'état sec m_{sec} dont la formule est donnée par l'expression suivante :

En [kg/kg]

$$W = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m_h - m_s}{m_s} = \frac{m_h}{m_s} - 1 \tag{3.11}$$

En [%]

$$W\% = 100 * (\frac{P_{humide}}{P_{sec}} - 1) \tag{3.12}$$

Avec m_h la masse du matériau à l'état humide, P_{humide} le poids du matériau à l'état humide et P_{sec} le poids du matériau à l'état sec.

Plusieurs équations peuvent être utilisées pour déterminer la quantité d'eau contenue dans un matériau de construction. Ces équations sont illustrées dans le tableau 3.1 selon l'état du matériau.

Tableau 3.3 Expressions de la teneur en eau

Teneur en eau	Expression
État sec	$W_m = \frac{m_e}{m_{sec}} = \frac{m_{hum} - m_{sec}}{m_{sec}} = \frac{m_{hum}}{m_{sec}} - 1$
État saturé	$W_{sat} = \frac{\rho_{liquide}}{\rho_{sat}} \varepsilon' = \frac{(\rho_{sat} - \rho_{sec})}{\rho_{sat}} \varepsilon' = (1 - \frac{\rho_{sec}}{\rho_{sat}}) \varepsilon'$
Volumique	$W_{volu} = \frac{V_{eau}}{V_{total}} = \frac{V_{hum}}{V_{total}} - 1$
Par unité de volume	$W_{vol} = \frac{m_e}{V_{total}} = \frac{m_{hum} - m_{sec}}{V_{total}}$

ρ_{sat} , la masse volumique du matériau à l'état saturé s'exprime :

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{V_{sat}} \tag{3.13}$$

ε', le taux de changement de phase peut-être déterminer en utilisation la formule établie par (Kari, Perrin, & Foures, 1992).

$$\varepsilon' = \frac{f}{\rho_s} \frac{D_v}{D_w} \frac{p_{vs}}{R_v T} \frac{\partial HR}{\partial W} \tag{3.14}$$

- L'équation de conservation

$$\rho_o C \frac{\partial T}{\partial t} = -L_v \varepsilon' \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) \tag{3.15}$$

Avec $\dot{m} = \dot{m}_v + \dot{m}_a$

Le taux de changement de phase peut donc s'écrire :

$$\varepsilon' = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) - \rho_o C \frac{\partial T}{\partial t})/(L_v \frac{\partial \dot{m}}{\partial x}) \tag{3.16}$$

Le taux de saturation S définit par la relation (3-25) à une valeur comprise entre 0 et 1

$$S = \frac{W}{W_{sat}} = \frac{W_{sat}}{\rho_{liquide} * \varepsilon'} \tag{3.17}$$

Avec ρ_{sat} : masse volumique du matériau saturée; m_{sat} : masse volumique du matériau a l'état saturé; V_{sat} : volume à l'état saturé; ∂T : dérivée partielle de la température; P_{vs} : pression de vapeur saturante; $\partial \dot{m}$: dérivée partielle du débit massique.

La pression de vapeur saturante d'eau (P_{sat}) représente la valeur maximale atteinte par la pression partielle d'un système à l'état d'équilibre à une température donnée. Cette température est appelée la température de rosée (Tr). Lorsque la température de rosée est atteinte à l'intérieur d'une enveloppe de bâtiment, il y a risque de condensation. La pression de vapeur saturante dépendant de la température du milieu. Dans la littérature, plusieurs expressions empiriques sont utilisées pour la détermination de la pression saturante. Le tableau 3.2 illustre certaines expressions utilisées pour la détermination de la pression saturante et le tableau 3.3, les expressions pour la détermination des coefficients de diffusion de l'humidité. La différence entre les expressions énumérées dans le tableau 3.2 est basée sur les coefficients qui lient chacune des expressions et la méthode de déterminations de la température T.

Tableau 3.4 Expressions utilisées par certains auteurs pour la détermination de la pression saturante

	Les expressions	Condition d'utilisation
Expression de Künzel, 1995	$p_{vs} = 611.\exp(\frac{a.T}{T_o + T})$	$a = 22{,}44$ pour $T_o = 272{,}44$°C et $T < 0$ °C $a = 17{,}08$ pour $T_o = 234{,}18$°C et $T \geq 0$ °C
Expression de Chalotte Abelé, 2009	$p_{vs} = 610{,}5.\exp(\frac{17\,269\,T - 4717{,}03}{T - 35{,}85})$ (1) $p_{vs} = 610{,}5.\exp(\frac{21\,875\,T - 5975{,}16}{T - 7{,}65})$ (2)	(1) $T > 273{,}15K$ $T < 273{,}15K$ (Norme NF EN ISO 13788)
Expression de Walid Mchirgui, 2012	$p_{vs} = \exp(235\,771 - \frac{4042{,}9}{T - 37{,}58})$	0< T <80 °C
Expression de Berger, 2014	$p_{vs} = \exp(658\,094 - \frac{7066{,}27}{T} - 5\,976\ \ln T)$	

La constante de la vapeur d'eau R_v est égale au rapport de la Constante des gaz parfait R par la masse du vapeur d'eau dans le matériau M_v et déterminée par l'expression (3.18).

$$R_v = \frac{R}{M_v} \tag{3.18}$$

Les coefficients de diffusion de la vapeur dans l'air D_v et d'humidité due à la teneur en eau peuvent être déterminés par les formules :

$$D_v = 2{,}1710^{-5}\frac{P_a}{P}\left(\frac{T}{273{,}5}\right)^{1{,}88} \tag{3.19}$$

$$D_w = D_T.\left(\frac{\frac{\partial W_v}{\partial W}}{\frac{\partial W_v}{\partial T}}\right) \tag{3.20}$$

Les coefficients de diffusion de l'humidité due au gradient de la teneur en eau D_w et celui dû au gradient de température D_T étant liés, ils peuvent être déterminés par les équations établies par (Zaknoune, Glouannec, Salagnac, & Le Bideau, 2010).

Tableau 3.5 Expressions nécessaires pour la détermination des coefficients de diffusion
Tiré de Zaknoune et al. (2010, p.3)

Phase liquide	Gradient de température	$D_T = 0$
	Gradient de teneur en eau	$D_W = \exp\left(P_1 - \frac{P_2}{W}\right)$
Phase vapeur	Gradient de température	$D_T = \mu k_r^g D_o \left(\frac{M_{air} M_{vap}}{MRT}\right) \frac{\partial P_{vap}^g}{\partial T}$
	Gradient de teneur en eau	$D_W = \mu k_r^g D_o \left(\frac{M_{air} M_{vap}}{MRT}\right) \frac{\partial P_{vap}^g}{\partial W}$
$\mu k_r^g = P_3 + P_4 W_{eq}^2 + P_4 W_{eq}^3$ et $D_o = 2.1710^{-7} \left(\frac{T}{273,5}\right)^{1,88}$ $W_{eq} = \frac{W - W_{hygr}}{W_{sat} + W_{hygr}}$		

3.2.7 Humidité relative et coefficient d'absorption du liquide

L'humidité relative HR représente le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau p_v et la pression de la vapeur saturante p_{vs} à même température (Mchirgui, 2012).

$$HR = 100 * \frac{P_v}{Pvs} \qquad ((3.21)$$

Le coefficient d'absorption du liquide est une quantité locale qui mesure la capacité d'un matériau à absorber un liquide qui le pénètre.

3.3 Modélisation numérique

3.3.1 Présentation du logiciel

Le logiciel WUFI Pro 6.2 est un dérivé de WUFI Pro, un logiciel développé par l'Institut Fraunhofer pour la physique du bâtiment (IBP) à Holzkirchen en Allemagne et validé par des mesures expérimentales pour plusieurs concepts physiques dont l'auteur est (Künzel, 2012). La méthodologie des études et les hypothèses pour les simulations à l'aide des différents logiciels WUFI ont été définies en collaboration avec le CSTB : Division Enveloppes et Matériaux innovants (Künzel, 2012). Le logiciel de simulation WUFI Pro 6.2 est utilisé pour l'évaluation de la performance hygrothermique des composants du bâtiment. Le logiciel calcule le transport couplé de chaleur et d'humidité, le transport de liquide, la diffusion de la vapeur d'eau dans les composants monocouches ou multicouches dans les conditions climatiques réelles. Il effectue les calculs hygrothermiques unidimensionnels sur les sections des composants du bâtiment, en tenant compte de l'humidité intégrée, de la pluie battante, du rayonnement solaire, du rayonnement à ondes longues, du transport capillaire, de la chaleur lente de fusion, des données météorologiques et de la condensation hivernale et estivale. Les profils de température, d'humidité relative à travers le mur, la teneur en eau totale du mur et pour chaque composant du mur sont analysés. Les normes internationales intégrées à ce logiciel sont [ASHRAE 160], [ISO 13788] et [NF EN 15 026] associés aux fiches techniques allemandes [WTA 6-2] (Künzel, 2012). Son interface et son espace de travail se présentent comme l'indique la figure 3.2 et 3.3.

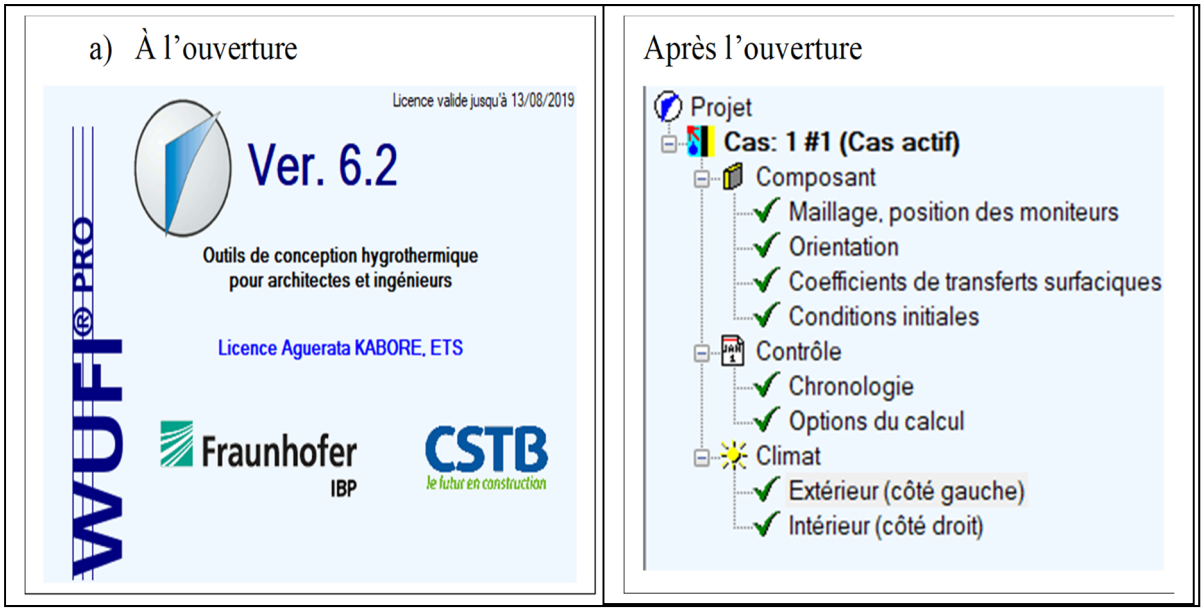


Figure 3.2 Interface de WUFI Pro 6.2

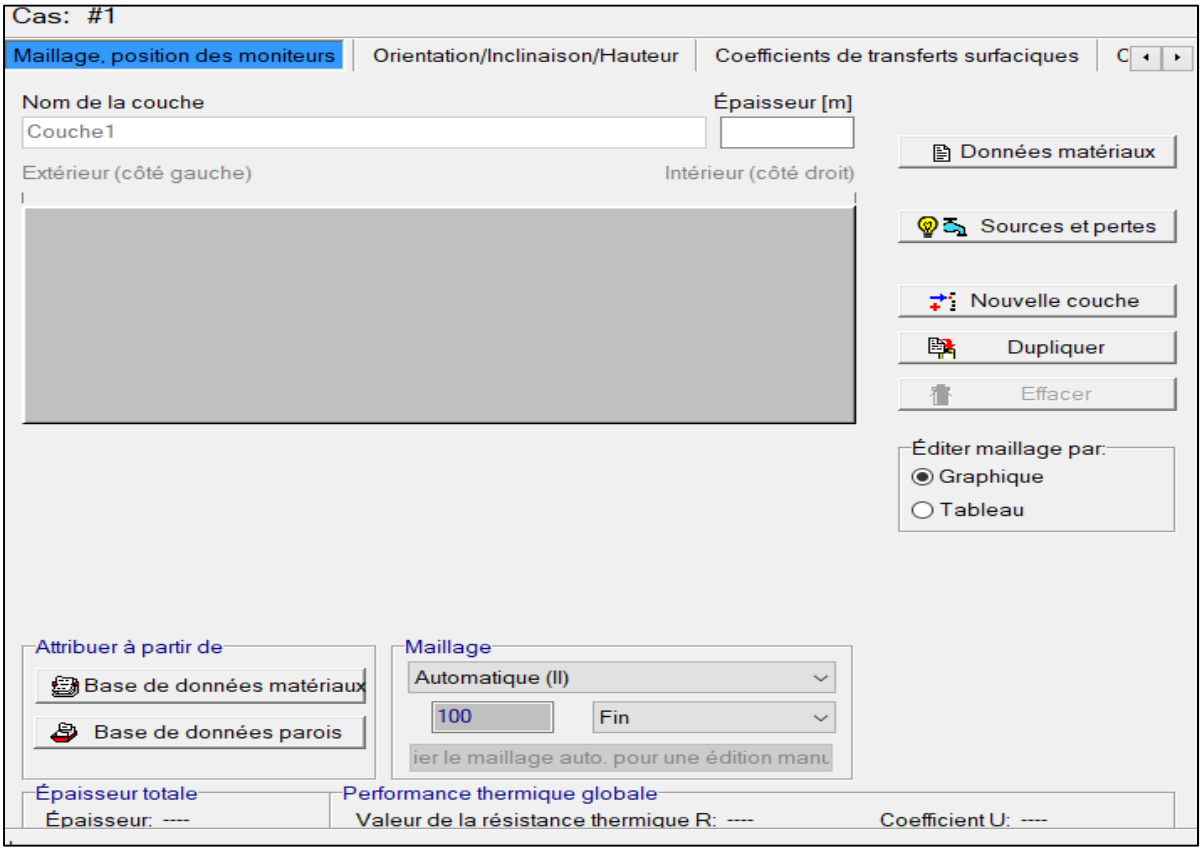


Figure 3.3 Espace de travail

Après avoir choisi le logiciel pour la simulation hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment construit à Montréal au Canada et une ville du Burkina Faso appelé Dori, il est nécessaire de déterminer la norme que nous allons utiliser pour la suite du travail. Le reste des normes présentent dans le logiciel WUFI Pro 6.2 sont à l'annexe I (page 158).

3.3.2 Norme utilisée pour la simulation présente dans WUFI Pro 6.2

La Norme [ANSI/ASHRAE 160, 2009] est une norme qui spécifie les critères de conception basés sur la performance afin de prévoir, réduire ou atténuer l'humidité traversant les éléments de l'enveloppe du bâtiment en fonction du climat, du type de construction et du fonctionnement du système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) (ANSI/ASHRAE, 2016). Cela inclut les critères de sélection des procédures analytiques, d'intrants, d'évaluation et d'utilisation des résultats.

La norme ANSI/ASHRAE :

- S'applique à tout type de bâtiment, à la conception de nouveaux bâtiments ainsi qu'à la rénovation des bâtiments existants;
- S'applique à toutes les zones intérieures et extérieures et aux cavités de l'enveloppe du bâtiment;
- Mais ne traite pas directement le confort thermique ou la qualité d'air intérieur.

La procédure de calcul par cette norme est présentée par l'organigramme de la figure 3.4.

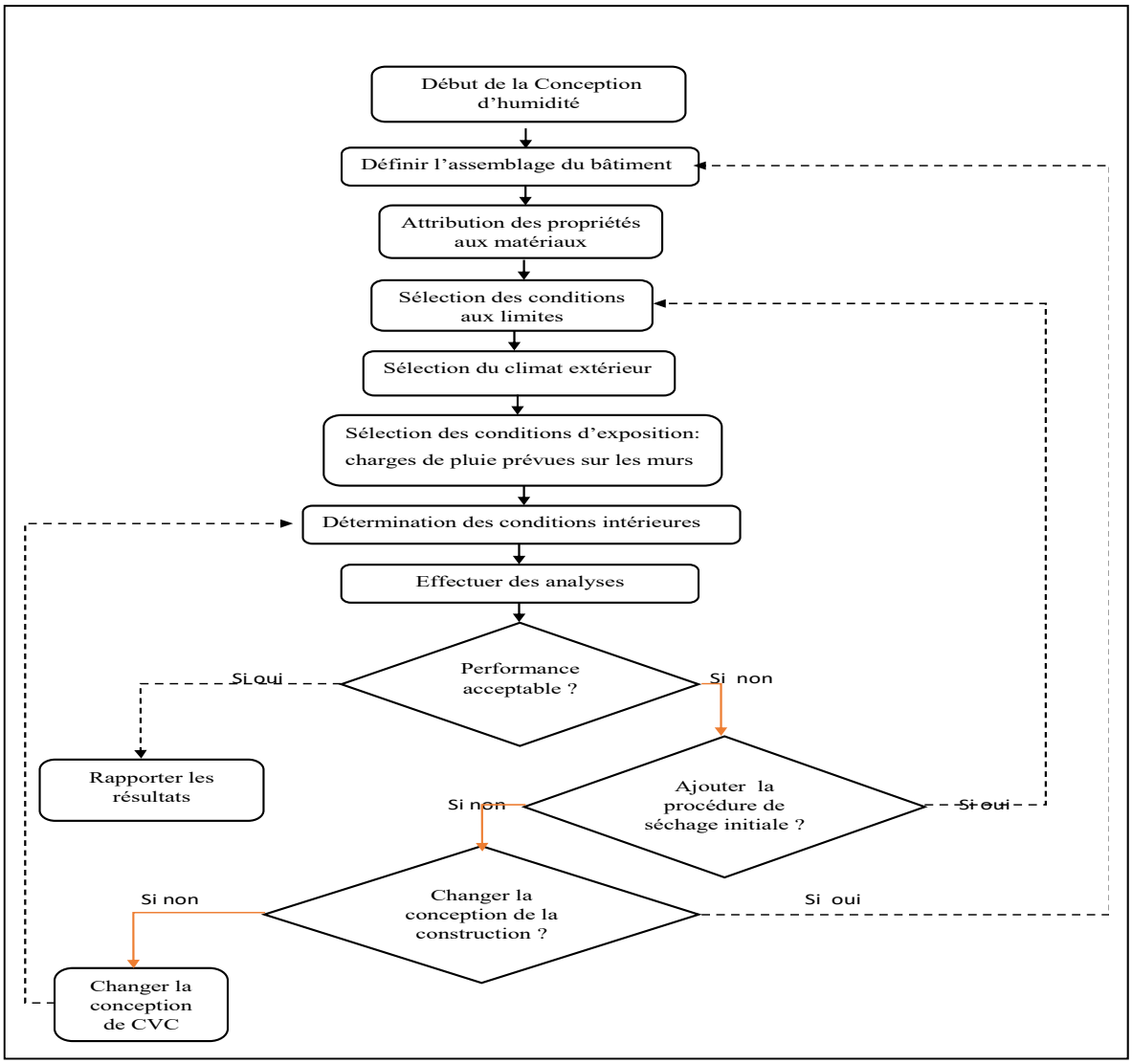


Figure 3.4 Organigramme de calcul avec la norme ANSI/ASHRAE 160

3.3.3 Facteurs pertinents

Les facteurs pertinents pour la simulation hygrothermique des composants de l'enveloppe du bâtiment dans WUFI Pro 6.2 sont illustrés par la figure 3.5

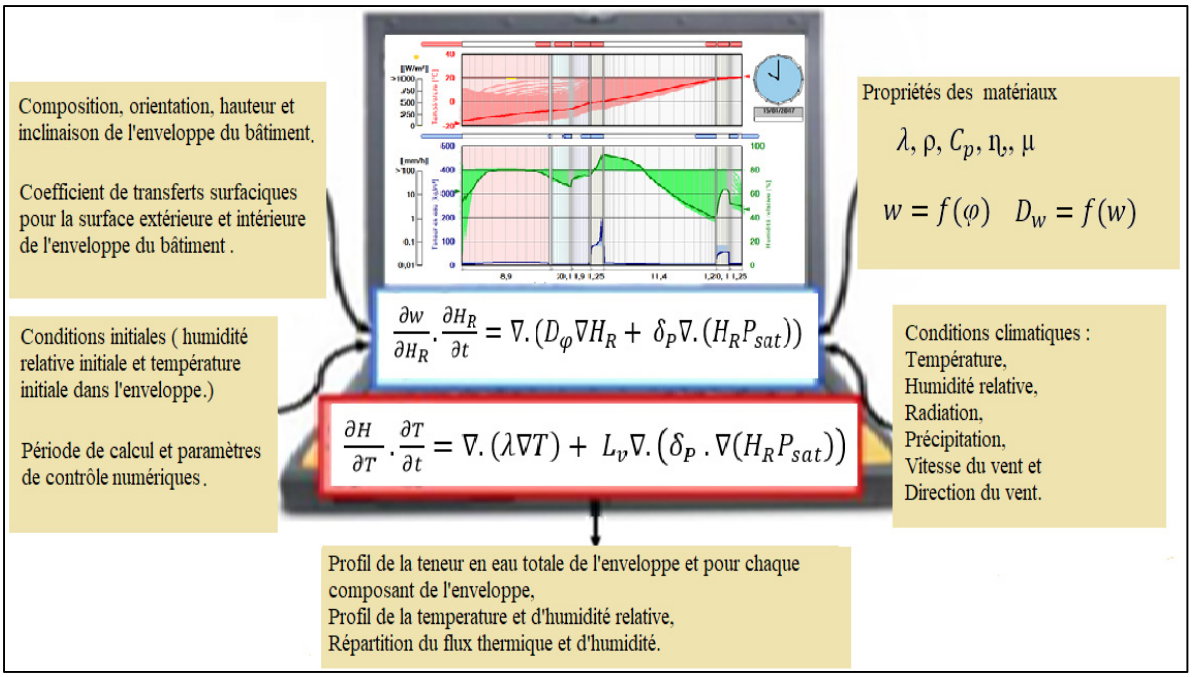


Figure 3.5 Modèle globale pour la méthode de calcul numérique par WUFI Pro 6.2

La première équation représente l'équation de la conservation de la masse et la deuxième l'équation de la conservation de chaleur ou d'énergie.

Conclusion du chapitre

Les modèles de transfert hygrothermique des matériaux existant dans la littérature sont nombreux et divers. Parmi ces modèles, certains sont énumérés dans ce chapitre et peuvent être utilisés pour les calculs des performances hygrothermiques des matériaux ou systèmes utilisés pour l'étude. Cependant, des mesures expérimentales n'ont pas été effectuées par limite de temps, les données pour la simulation de cette étude sont donc prises dans la littérature (données de Driss Samri, 2008 et de Dahkal 2017). Avant d'entamer la simulation numérique pour nos cas, nous allons posséder à la validation du logiciel WUFI Pro 6.2 en utilisant les travaux de (Dahkal 2017). Le chapitre 4 présente les résultats de la calibration et vérification du logiciel WUFI Pro 6.2.

CHAPITRE 4

VÉRIFICATION DU LOGICIEL WUFI Pro 6.2

Pour la vérification du logiciel, nous avons utilisé les travaux de deux auteurs (Dahkal, 2017 et Lamalle, 2016). La simulation a été effectuée par les données de la recherche de Dahkal, 2017, et celles de Lamalle, 2016. Les mêmes hypothèses ont été utilisées pour WUFI Pro 6.2 afin de confronter les résultats obtenus à ceux de la version WUFI Pro 5.1 utilisée par Dahkal, 2017 et Lamalle, 2016. Ces deux travaux ont été choisis parce qu'ils possèdent les données complètes nécessaires pour refaire la simulation hygrothermique des murs utilisés par ces deux auteurs. De ce fait, les hypothèses et les conditions des limites utilisées par les deux auteurs sont énumérées à la suite, enfin de pouvoir entamer la simulation. Par la suite on entame notre étude de cas et étude paramétrique avec confiance concernant le modèle de WUFI Pro 6.2.

4.1 Hypothèse pour la simulation Dahkal, 2017 et Lamalle, 2016

Pour commence l'utilisation du logiciel WUFI Pro 6.2, les hypothèses utilisées sont énumérées comme suit :

1- Échantillons —isotropes, homogènes et sans variation volumétrique;
2- Aucune réaction chimique entre l'eau dans toutes les 3 phases;
3- Pas de dissipation d'énergie lors des flux;
4- Aucun paramètre ne dépend du temps ;
5- Pas de relation univalente entre la teneur en eau et l'humidité relative;
6- Pas d'infiltration d'air (paroi étanche à l'air);
7- Pas de pertinence de la température dans la sorption d'humidité;
8- Pas de convection naturelle ou forcée.

4.2 Condition aux limites

Pour le climat extérieur, le fichier météorologique de la ville de Toronto présente dans les fichiers de WUFI Pro 6.2 a été utilisé pour la simulation de vérification avec le logiciel WUFI Pro 6.2 et les fichiers climatiques de Liège au Belgique produites par Lamalle, 2016 ont été introduites dans WUFI Pro 6.2 pour pouvoir effectuer la simulation. Pour le climat intérieur, la courbe sinusoïdale a été utilisée comme pour Dahkal, 2017 et celui de la Norme EN 15 026 pour Lamalle, 2016. Les conditions aux limites utilisées par (Dhakal 2017; Lamalle, 2016) et aussi utilisées dans le logiciel WUFI Pro 6.2 pour la simulation sont énumérées comme suite :

1. Environnement intérieur : 21ºC ± 1ºC, RH 50 ± 10 % (courbe sinusoïdale pour Dahkal, 2017 et EN 15 026 pour Lamalle);
2. État initial : 20 °C et 80 % HR (constante dans la composante);
3. Orientation sud-est pour les murs de Dahkal, 2017 et Ouest pour les murs de Lamalle, 2016 afin de maximiser la combinaison exposition au soleil et attente de pluie ; surface verticale [R1 = 0, R2 = 0,07 m/s ; Bâtiment court - hauteur jusqu'à 10 m];
4. Absorptivité des ondes courtes (calcaire brillant et épicéa non traité) = 0,4;
5. Facteur d'absorption d'eau de pluie a_r = 0,7;
6. Pas de revêtements de surface;
7. ACH-8 pour la couche d'air (ventilée) pour l'assemblage 2 (Dahkal, 2017), pas de couche d'air pour l'assemblage de Lamalle, 2016;
8. Indice de cloud ou indice moyen de nuage: 2,64 pour Dahkal et 0,64 pour Lamalle (analysé des fichiers climatiques);
9. Période de simulation : 3 ans chacun :
   - **Dahkal**
   - ➢ Période de simulation :(1-10-2015 au 1-10-2018)
   - **Lamalle**
   - ➢ Période de simulation : (1-10-2016 au 1-10-2019)

10. Les autres non cités sont pris par défaut par Dahkal et par Lamalle donc par WUFI Pro 6.2;
11. Coefficients de transfert de chaleur (hi et he) : défaut du programme (coefficient constant) ; salut = 8.0W/m^{2}K, il = 17.0W/m^{2}K.

Les conditions aux limites ont été entrées dans le logiciel WUFI Pro 6.2 manuellement ou choisi directement dans la base de données du logiciel selon l'indication des deux auteurs. Des fenêtres sont spécialement conçues pour l'introduction des conditions aux limites, de la conception des murs et celles des hypothèses dans le logiciel.

4.3 Configuration d'assemblage de mur pour la vérification

4.3.1 Pour la ville de Toronto défini par Dahkal

Pour la simulation, les enduits de chaux utilisés par Dahkal, 2017 ont les mêmes propriétés que l'enduit de chaux. Ils ont été utilisés pour le mur coté intérieur et extérieur pris dans WUFI Pro 6.2 pour le mur 1. Le typar qui est une membrane pare-imtempérie et pare-air dans cet exemple n'existe pas dans le répertoire de la base de données des matériaux WUFI Pro 6.2. Il a été remplacé par un pare-air (3M^{TM} Vapor permeable air barrier 3015) qui présente des propriétés presque identiques au typar. La figure 4.1 présente les deux murs de simulation établie par (Dhakal, Berardi, Gorgolewski, & Richman, 2017) dans ses travaux. Ces deux assemblages de murs sont utilisés pour la simulation avec WUFI Pro 6.2.

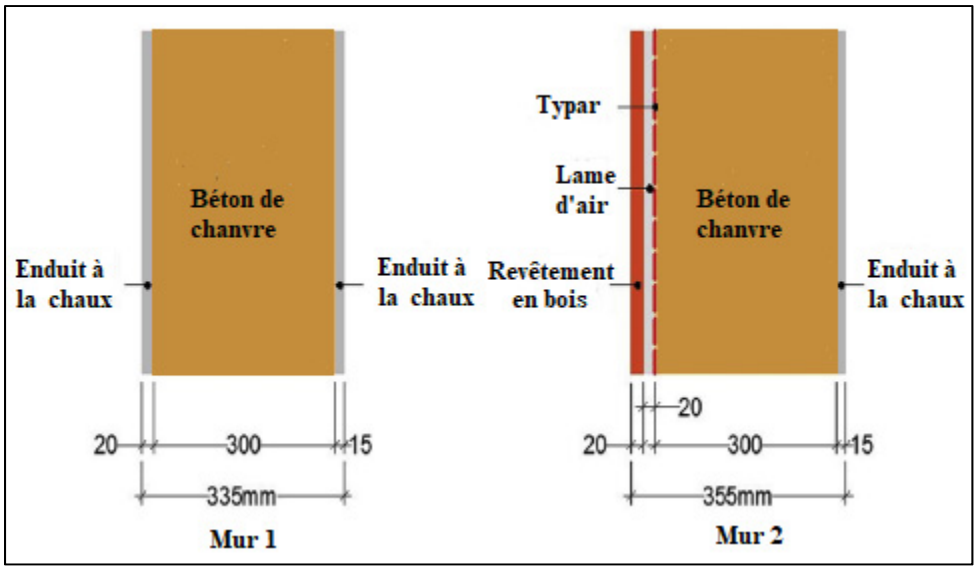


Figure 4.1 Assemblage de mur de simulation pour la vérification (WUFI Pro 6.2) et Dahkal, 2017
Tiré de (Dhakal, Berardi, Gorgolewski, & Richman, 2017) p. 67

Les entrées pour le matériau de chanvre dans le logiciel WUFI Pro 6.2 sont identiques à celle de Dahkal, 2017. Par définition, la présence de la lame d'air dans le mur 2 permet de faciliter la migration de la vapeur d'eau pouvant traverser le mur extérieur. Son but est d'éviter la que la température de l'interface isolant / paroi extérieure soit en dessous du point de rosée afin de réduire le risque de condensation. Le tableau 4.1 présente les données d'entrées du béton de chanvre qui doit introduire dans WUFI Pro 6.2.

Tableau 4.1 Données d'entrée du béton de chanvre
Tiré de Dahkal, 2017

Propriété hygrothermique	Valeurs
Densité à état sec [kg/m^3]	388
Porosité du matériau [m^3/m^3]	0,66
Chaleur spécifique état sec [J/kg K]	1560
Conductivité thermique état sec [W/m K]	0,1
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur à état sec	4,85
Supplément de conductivité thermique dépendante de l'humidité [% M, %]	3,34
La teneur maximale en eau [kg/m^3]	655
La saturation en eau libre [kg/m^3]	424
La teneur en eau à 80 % - [kg/m^3]	29
Coefficient d'absorption liquide	0,074
Humidité type de construction [kg/m^3]	286

Les autres matériaux constituant le mur ont été choisis dans le répertoire de la base des données des matériaux WUFI Pro 6.2. Ces matériaux existent déjà dans le logiciel.

4.3.2 Pour la ville de Liège défini par Lamalle

Tous les matériaux utilisés par Lamalle ont été choisis dans WUFI Pro 5.1 et aussi dans WUFI Pro 6.2 sauf les valeurs en couleur qui ont été introduites dans WUFI Pro 5.1 par Lamalle et aussi dans WUFI Pro 6.2 pour la vérification des résultats (tableau 4.2). La figure 4.2 illustre la configuration des deux murs établie par (Lamalle, 2016) et le tableau 4.2 présente les données d'entrées pour ces travaux.

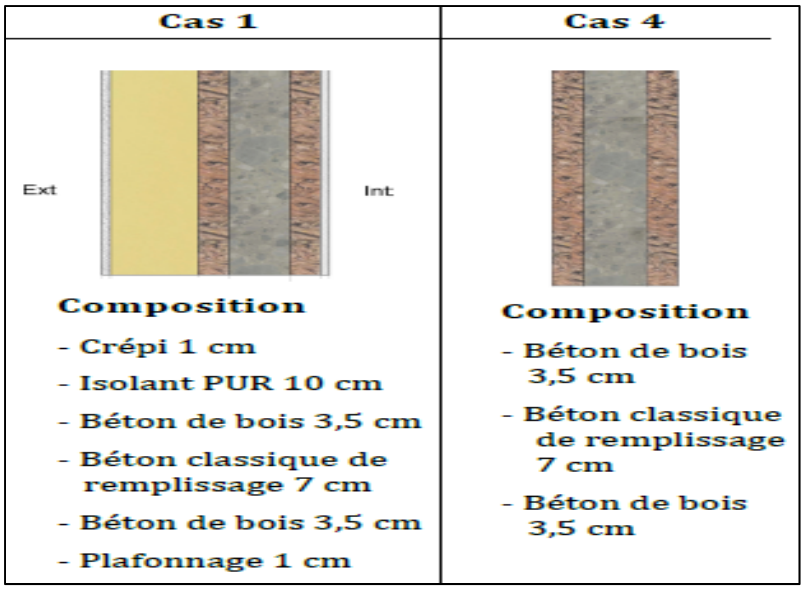


Figure 4.2 Assemblage de mur de simulation pour Lamalle et WUFI Pro 6.2; Tirée de (Lamalle, 2016), p.79)

Tableau 4.2 Données d'entrées des matériaux
Tirée de (Lamalle, 2016), p.79)

Nom de la couche	Matériau dans la base de données	Densité [kg/m^3]	Porosité [m^3/m^3]	Conductivité thermique [W/m K]	Résistance à la diffusion [-]
Crépi	Enduit extérieur minéral	1900	0,24	0,8	25
Isolant PUR	PUR (Cond.Th.0,03W/m K)	40	0,95	0,03	50
Béton de bois	Bloc béton d'argile expansé	800	0,67	0,1	4
Béton classique de remplissage	Béton E/C =0,5	2300	0,18	1,6	180
Plafonnage	Plafonnage intérieur (plâtre)	850	0,65	0,2	8,3
Panneau en fibres de bois	Panneau en fibre de bois	300	0,8	0,05	12,5
Isolant cellulose	Fibre de cellulose	50	0,95	0,034	1,8
Béton mousse de remplissage	Béton cellulose (Masse vol. 500kg/m^3)	500	0,77	0,12	8

4.3.3 Configuration avec WUFI Pro

Les figures 4.3 et 4.4 illustrent les configurations établies par les deux versions du logiciel WUFI Pro (WUFI Pro 5.1 et WUFI Pro 6.2). Après avoir terminé la configuration, cela signifie que les données de chaque matériau constituant le mur sont introduites dans le logiciel et la simulation peut alors commencer.

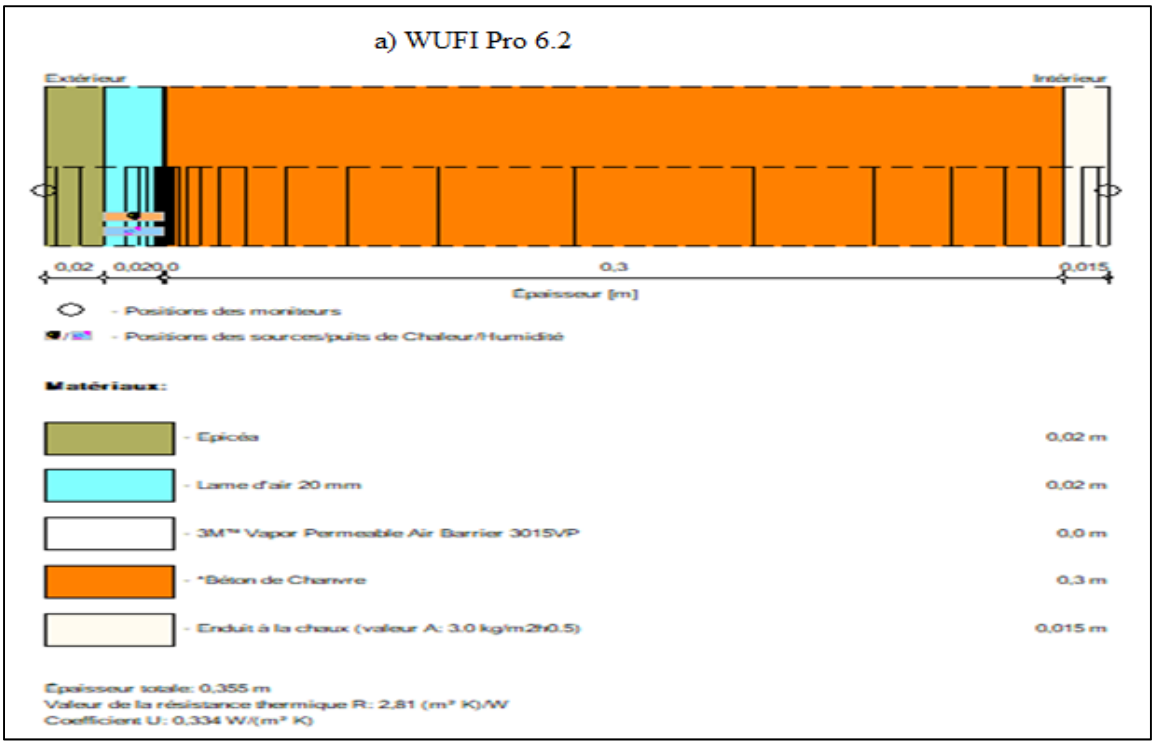


Figure 4.3 Assemblage du mur 2, WUFI Pro 6.2 (a) et Dahkal, 2017 (b)

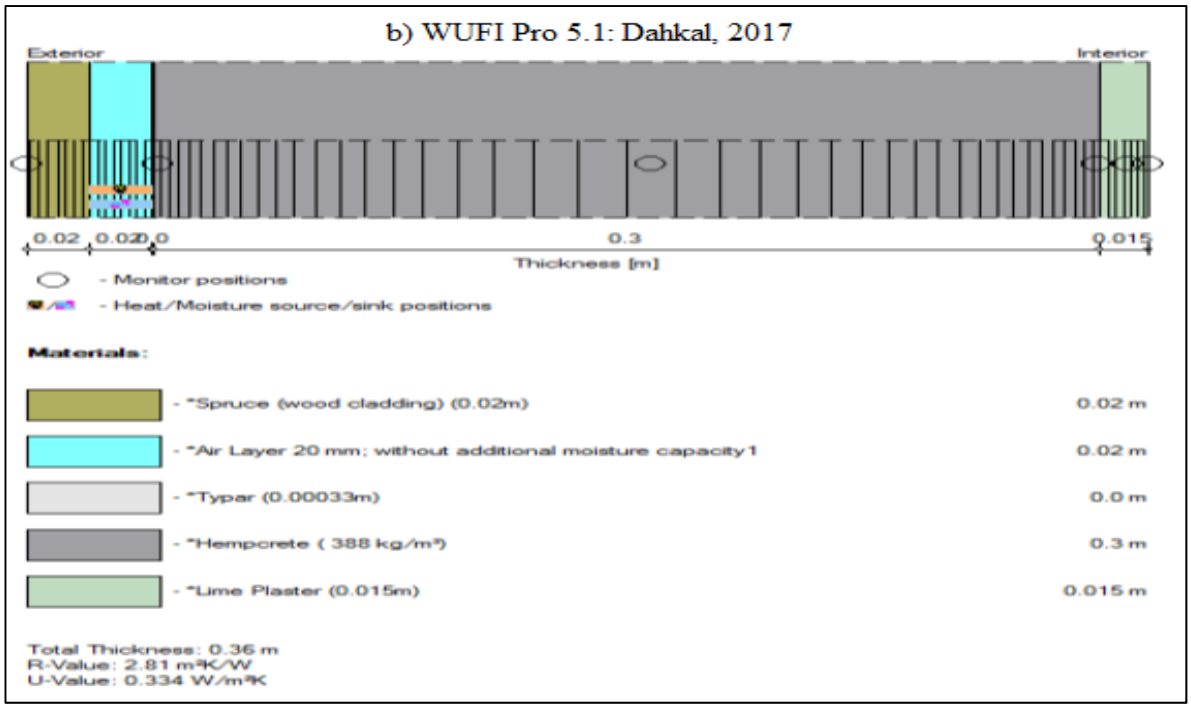


Figure 4.3 (suite)

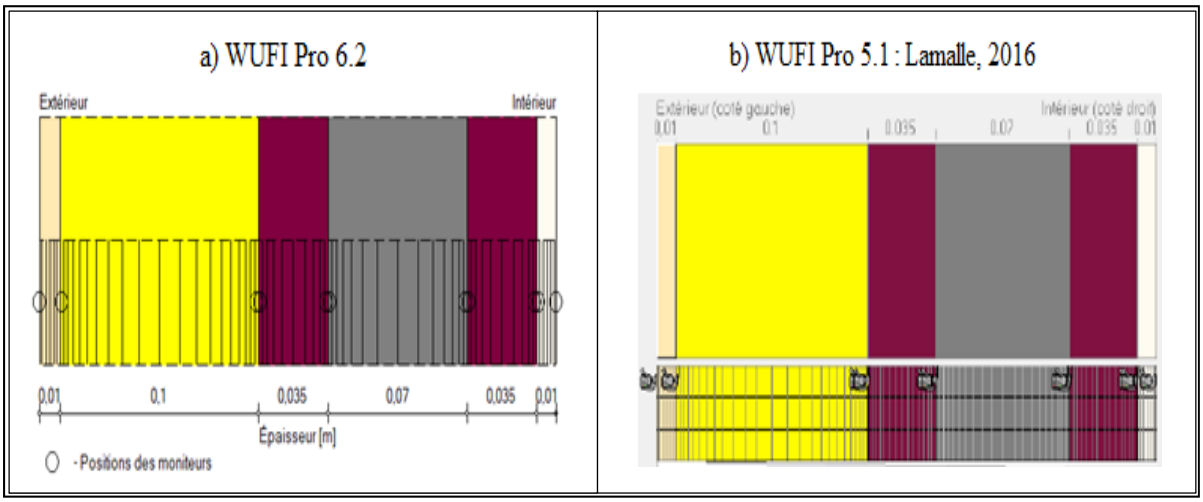


Figure 4.4 Cas 1, WUFI Pro 6.2 (a) et Lamalle, 2016 (b)

4.4 Vérification des résultats WUFI Pro 6.2 à ceux de Dahkal, 2017 et Lamalle, 2016

4.4.1 Vérification des résultats WUFI Pro 6.2 à ceux de Dahkal, 2017

Lorsqu'on lance les calculs avec l'outil de simulation WUFI Pro, une animation est proposée par le logiciel permettant de visualiser les courbes de température, d'humidité relative et de la teneur en eau dans la paroi. Ces animations sont comparées à celles de Dahkal, 2017 obtenues par WUFI Pro 5.1. La Figure 4.5 et 4.6 présente l'animation des murs 1 et 2 de la ville de Toronto pour la période du 01/10/2015 au 01/10/2018. La courbe en rouge est le profil de la température, l'immense étendue en rouge plate sur le profil de la température représente l'intervalle des valeurs prises en compte pendant la durée de la simulation de l'extérieur vers l'intérieur. Les deux autres courbes en bas représentent l'humidité relative en vert, et l'étendue en vert, l'intervalle des valeurs prises en compte durant la simulation, la courbe en bleue représente la teneur en eau.

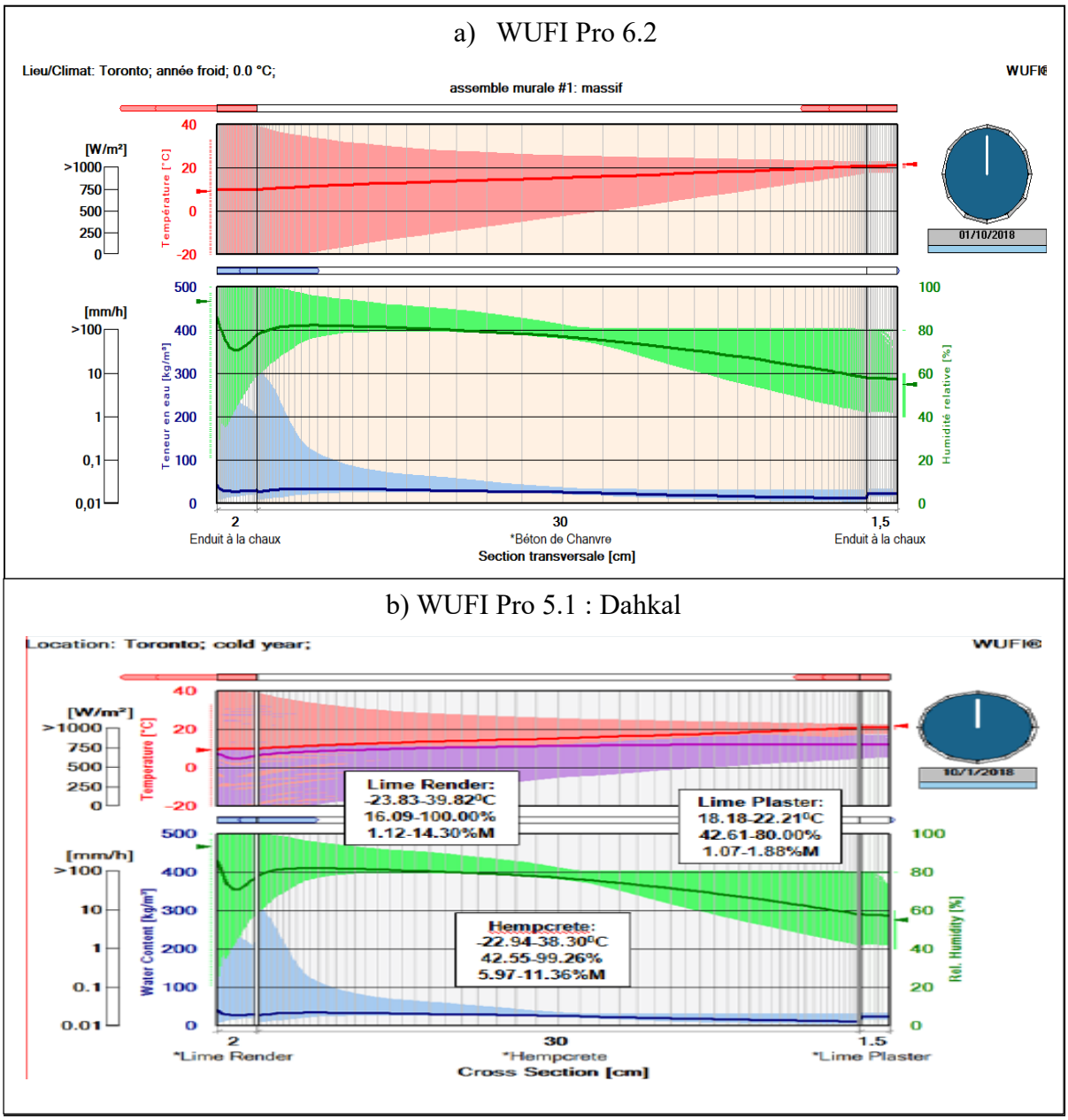


Figure 4.5 Animation pour le mur 1, a) WUFI Pro 6.2 et b) WUFI Pro 5.1 pour la ville de Toronto.

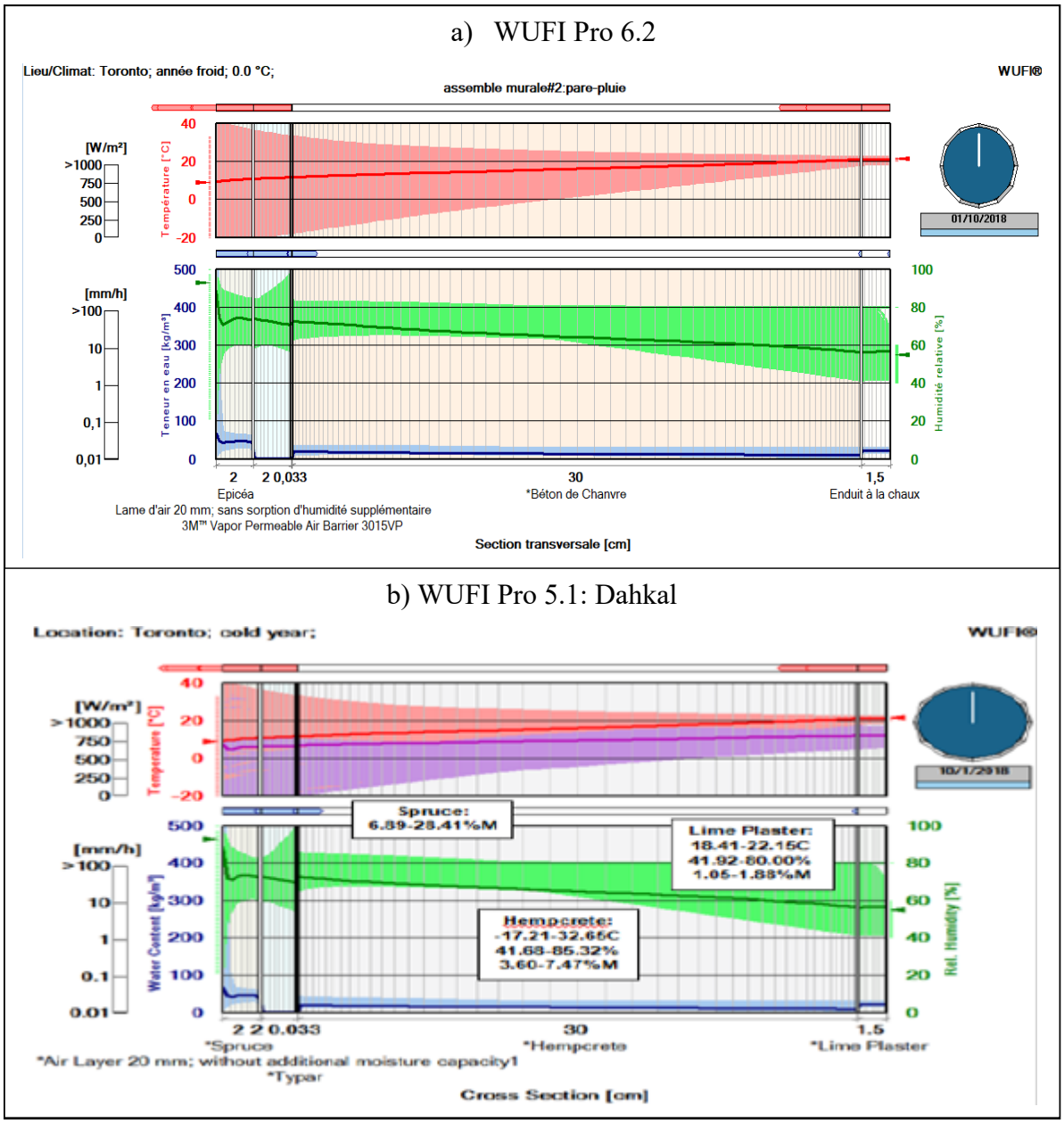


Figure 4.6 Animation pour le mur 2, a) WUFI Pro 6.2 et b) WUFI Pro 5.1 pour la ville de Toronto.

Après avoir présenté l'animation obtenue par les deux versions du logiciel WUFI Pro, le résumé des flux de chaleur, d'humidité et de la teneur en eau totale peuvent être analysés.

Le tableau 4.3 présente le résumé du flux de chaleur perdu à l'intérieur et à l'extérieur du mur de simulation et le gain de flux d'humidité à l'intérieur et à l'extérieur du mur. La teneur

en eau totale en début de simulation et à la fin de simulation, le maximum atteint et le minimum sont présentés par le tableau 4.4.

Tableau 4.3 Intégrale de flux par rapport au temps : mur 1

	Unité	WUFI Pro 6.2	Dahkal, 2017
Flux de chaleur, côté gauche	[MJ/m^2]	-489,01	-489,01
Flux de chaleur, côté droit	[MJ/m^2]	-487,69	-487,69
Flux d'humidité, côté gauche	[kg/m^2]	0,84	0,84
Flux d'humidité, côté droit	[kg/m^2]	2,62	2,62

Tableau 4.4 : Résumé de la teneur en eau totale : mur 1

	Unité	Début	Fin	Min	Max
WUFI Pro 6.2	[kg/m^2]	9,75	7,98	7,78	17,57
Dahkal, 2017	[kg/m^2]	9,75	7,98	7,78	17,57

Les figures 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12 illustrent les courbes de la teneur en eau totale, les teneurs en eau de l'extérieur et de l'intérieur du mur et la teneur en eau du béton de chanvre obtenues par Dahkal, 2017 et de la simulation WUFI Pro 6.2 pour la période du 1/10/2015/ au 1/10/2018 pour le mur 1.

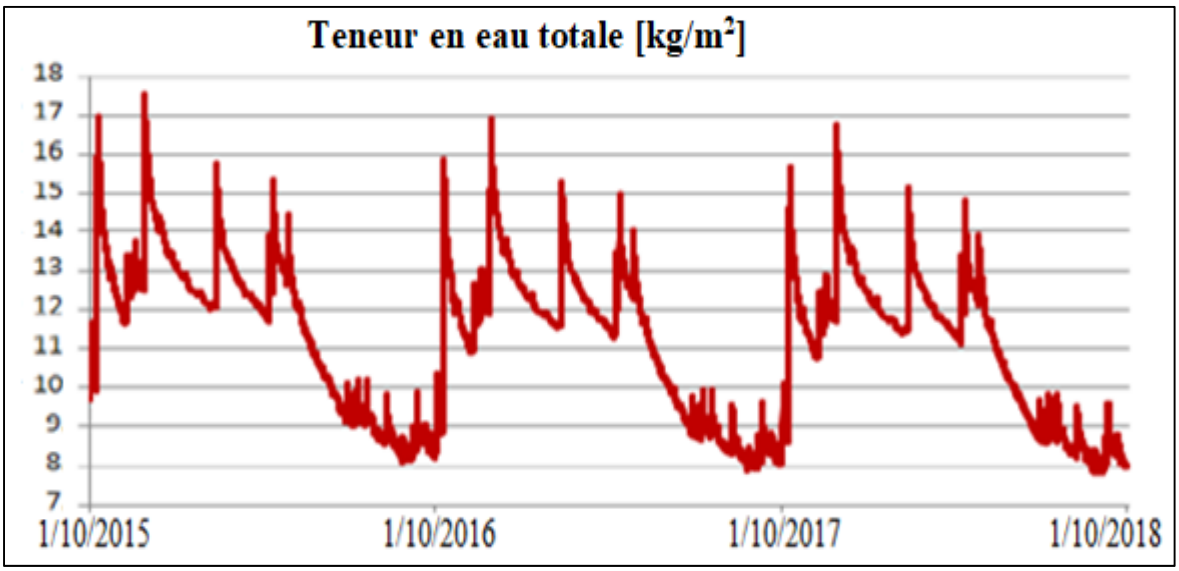


Figure 4.7 Teneur en eau (kg/m^2) du mur 1, Dahkal ,2017

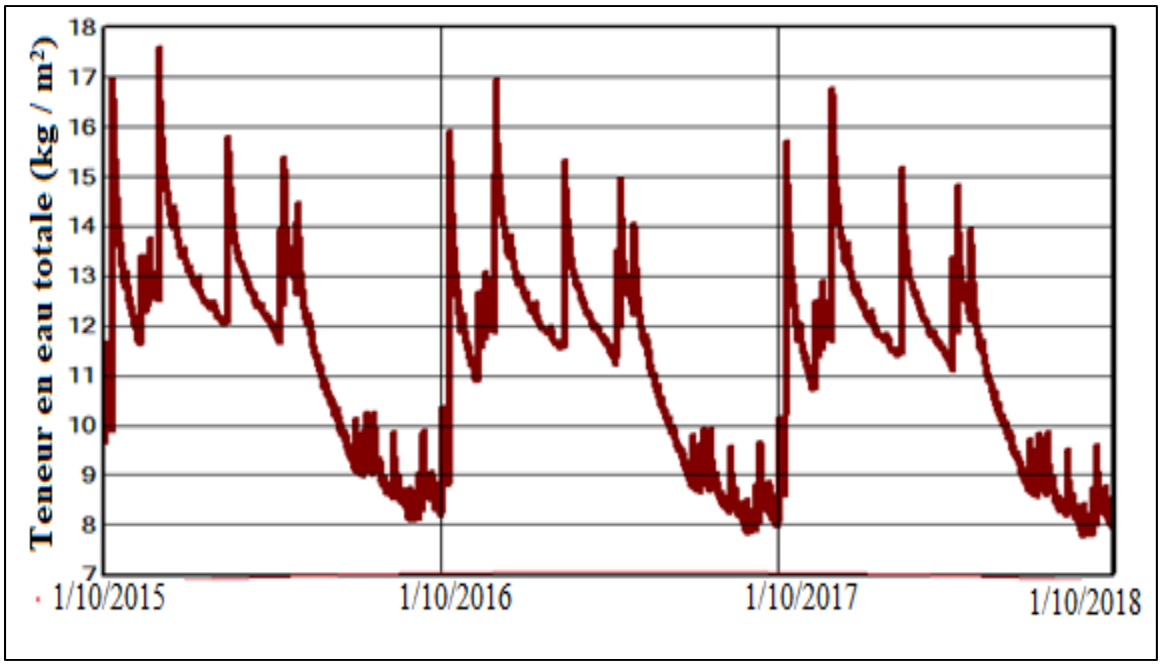


Figure 4.8 Teneur en eau (kg/m^2) du mur 1, WUFI Pro 6.2 [Aguérata Kaboré]

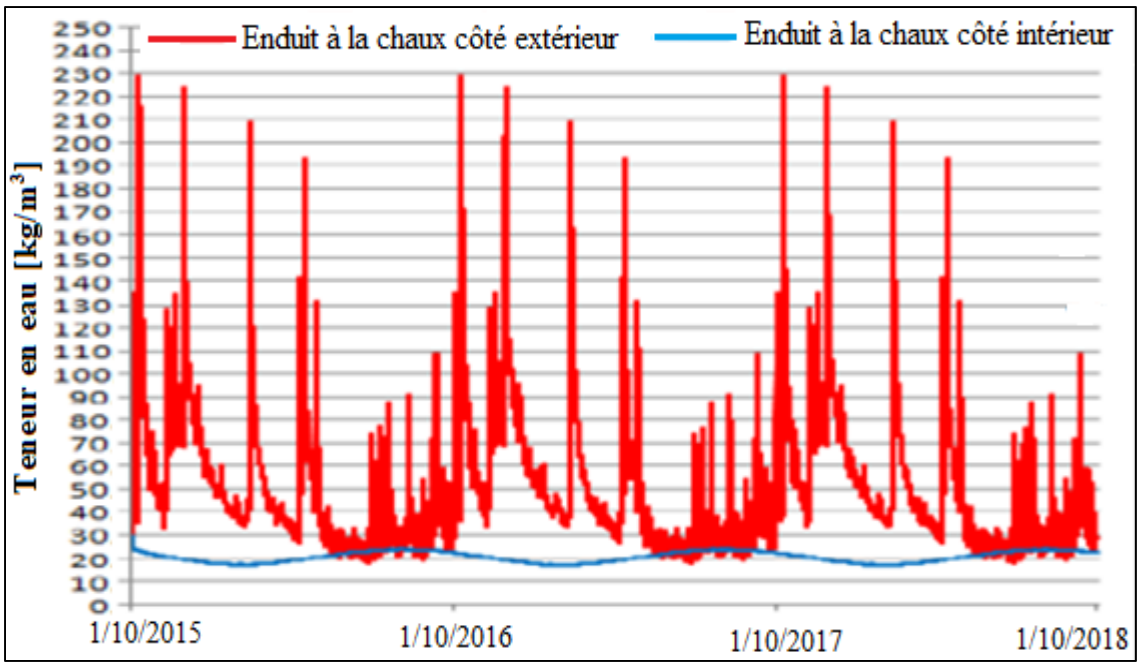


Figure 4.9 Teneur en eau des enduits de chaux du mur 1, Dahkal, 2017

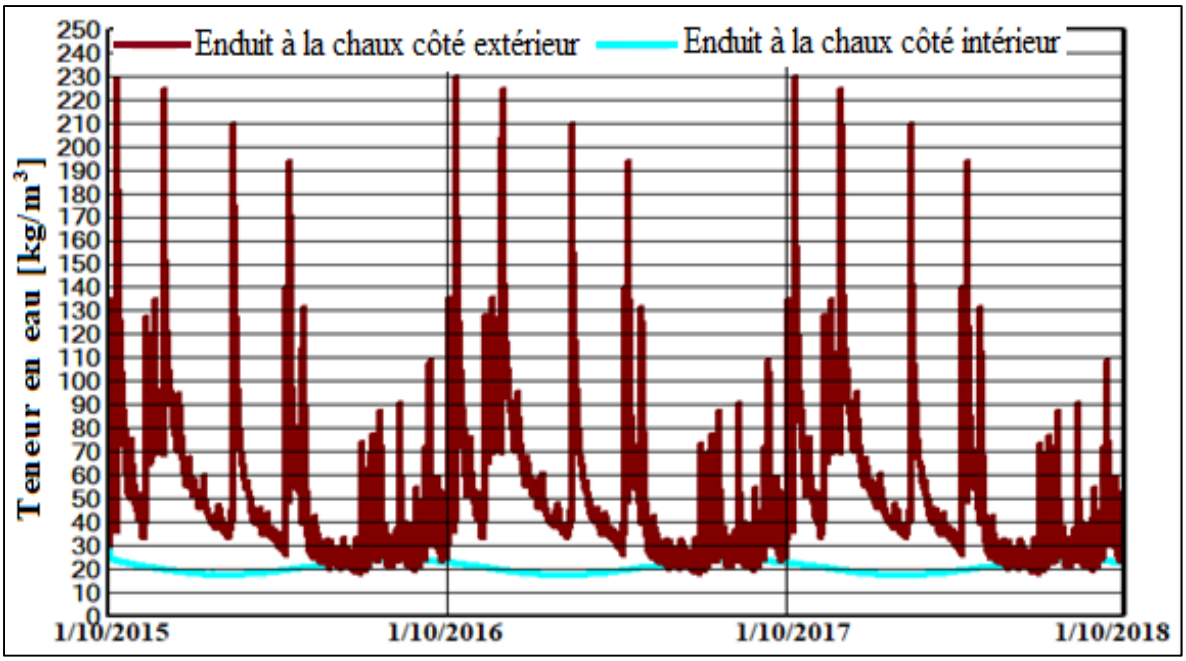


Figure 4.10 Teneur en eau des enduits de chaux du mur 1, WUFI Pro 6.2 [Aguérata Kaboré]

Figure 4.11 Teneur en eau du béton de chanvre du mur 1, Dhakal, 2017

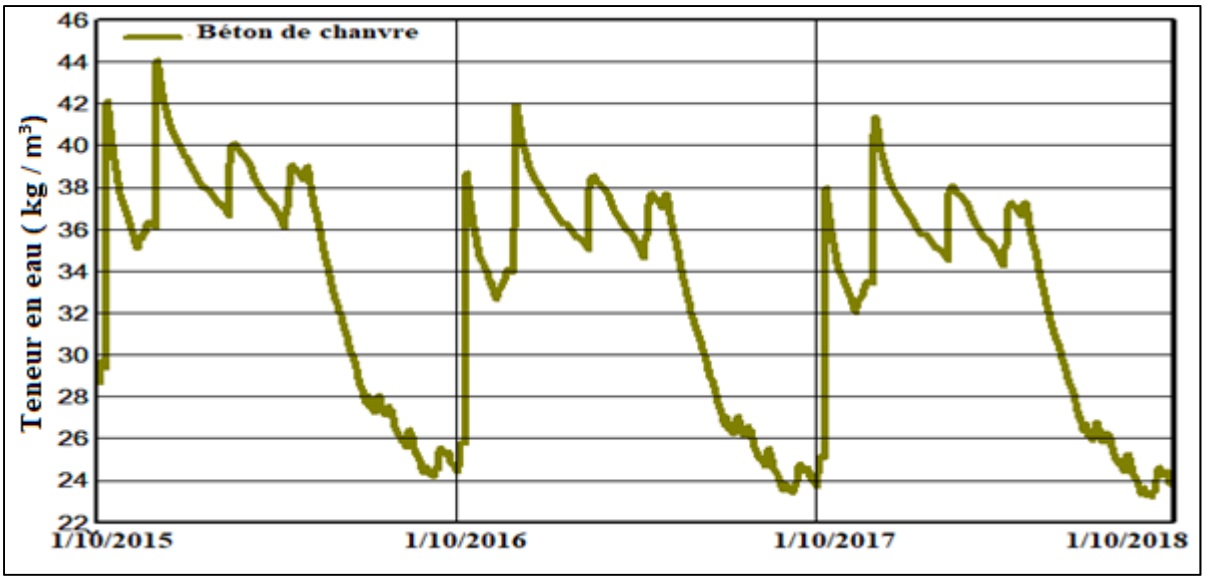


Figure 4.12 Teneur en eau du béton de chanvre du mur 1, WUFI Pro 6.2 [Aguérata Kaboré]

Lorsque nous observons les courbes obtenues par WUFI Pro 6.2 à la même période de simulation que Dahkal, 2017, on remarque qu'elles sont identiques. Il n'y a aucune différence entre les résultats obtenus par la simulation WUFI Pro 5.1 (Dahkal, 2017) et WUFI Pro 6.2. Après avoir vérifié les résultats pour le mur 1, nous allons passer à la vérification de ceux du mur 2 en utilisant les courbes de sa teneur en eau totale.

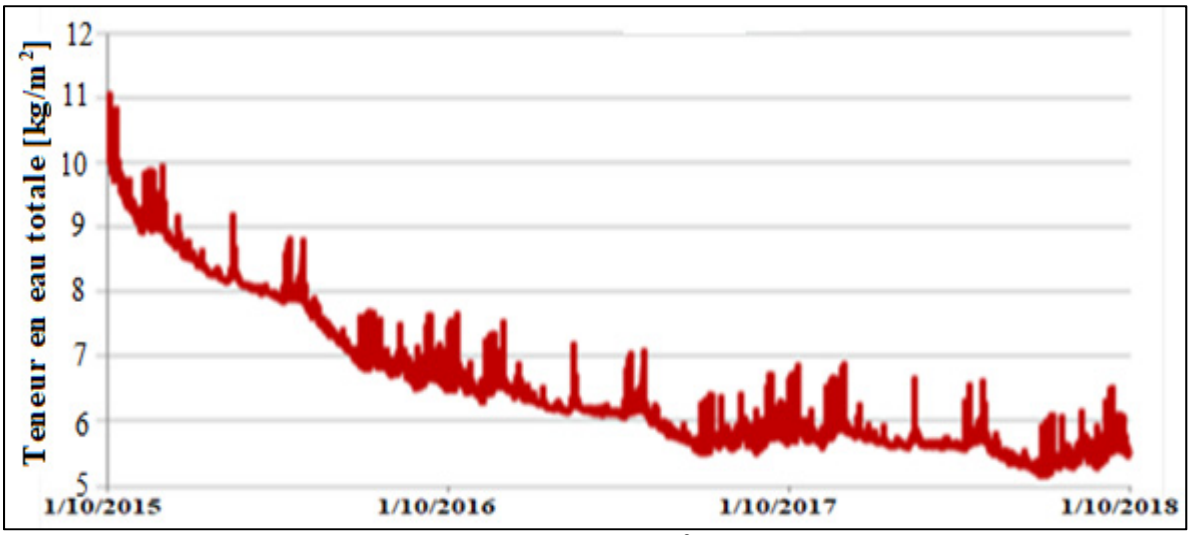


Figure 4.13 Teneur en eau totale (kg/m^2) du mur 2, Dahkal, 2017

Figure 4.14 Teneur en eau totale (kg/m^2) du mur 2, WUFI Pro 6.2 [Aguérata Kaboré]

Les figures 4.13 et 4.14 montrent les courbes de la teneur en eau totale du mur 2 obtenues par WUFI Pro 5.1 (Dahkal, 2017) et WUFI Pro 6.2. Ces deux figures sont pratiquement identiques. Avant de conclure de la validation de la version WUFI Pro 6.2, une dernière simulation avec les données des travaux de Lamalle, 2016 sera réalisé au paragraphe 4.4.2.

4.4.2 Vérification des résultats WUFI Pro 6.2 à ceux de Lamalle, 2016

La Figure 4.15 présente l'animation du cas 1 de la ville de Liège pour la période du 01/10/2016 au 01/10/2019 et celle obtenue par Lamalle, 2017. Cette figure permet d'observer la répartition de la température, de l'humidité et de la teneur en eau dans l'ensemble du mur.

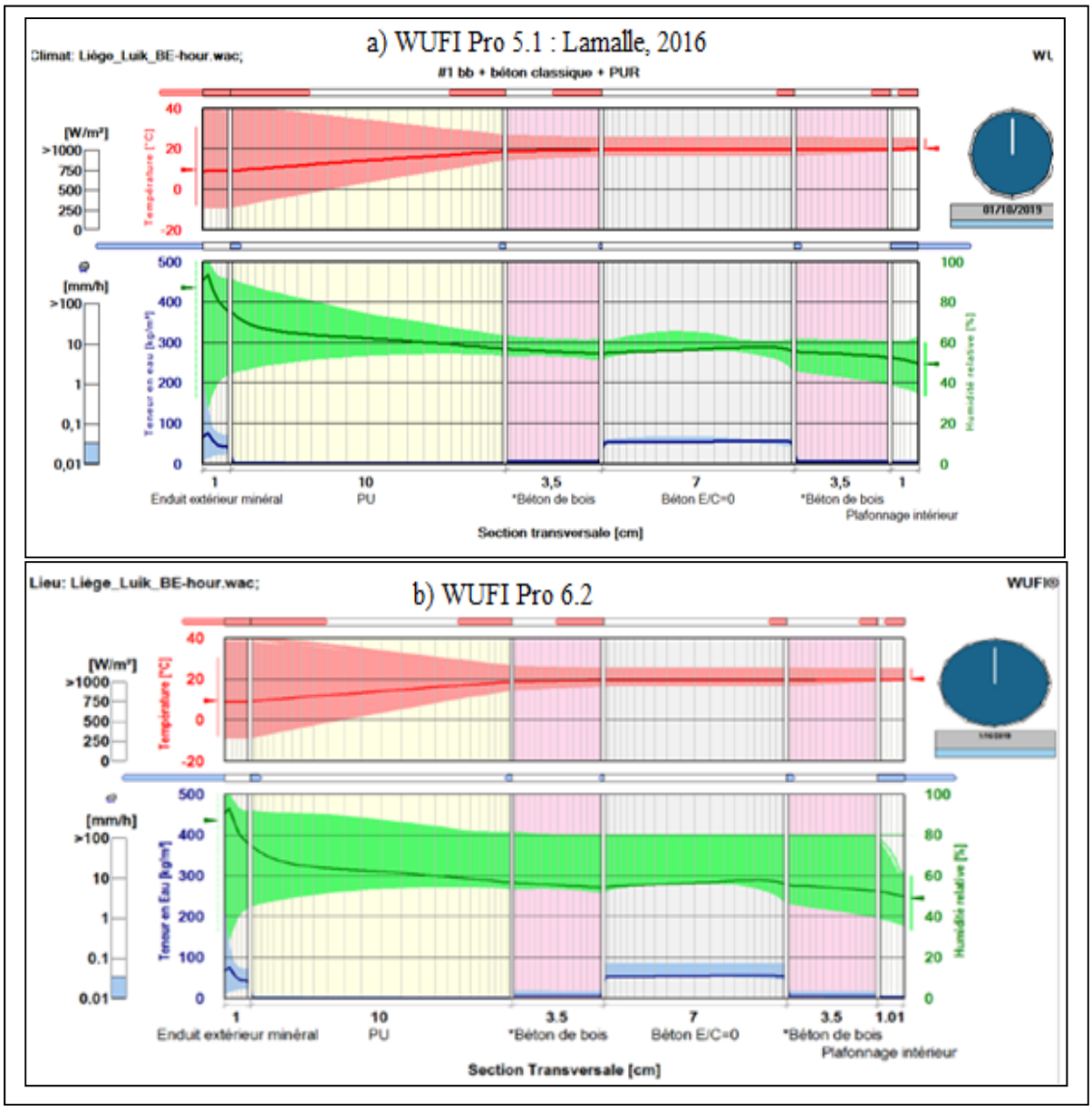


Figure 4.15 Animation pour le cas 1, Liège pour le 1/10/2019

La figure 4.15 nous conduit à la présentation des résultats de la simulation. Elle présente une animation de la fin de la simulation (1/10/2019).

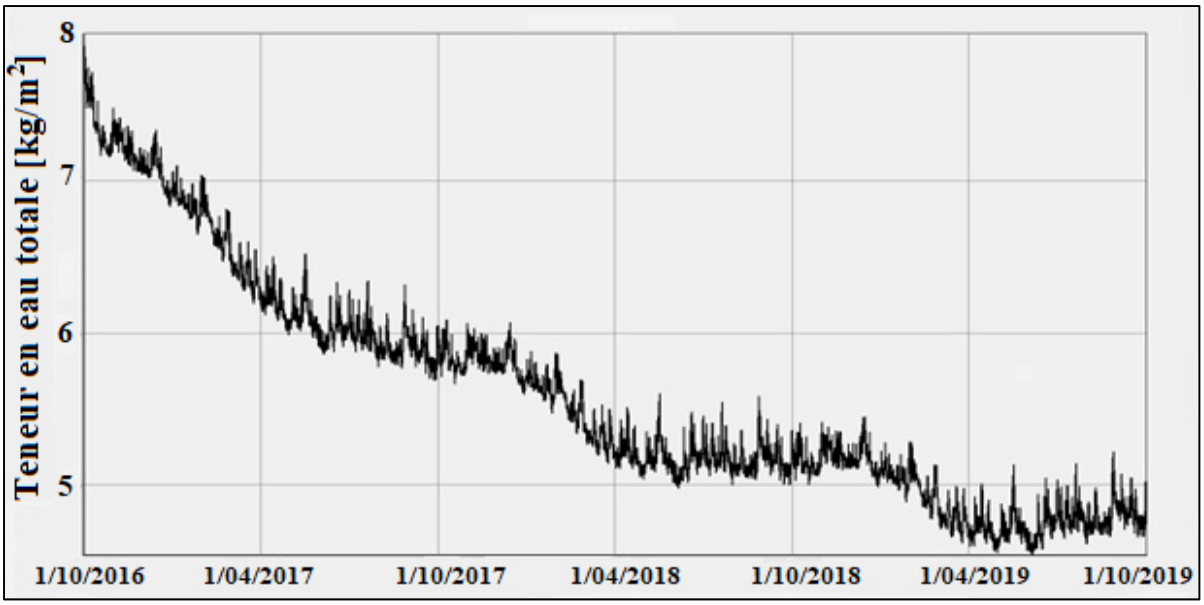


Figure 4.16 Teneur en eau totale du cas 1, Lamalle, 2016

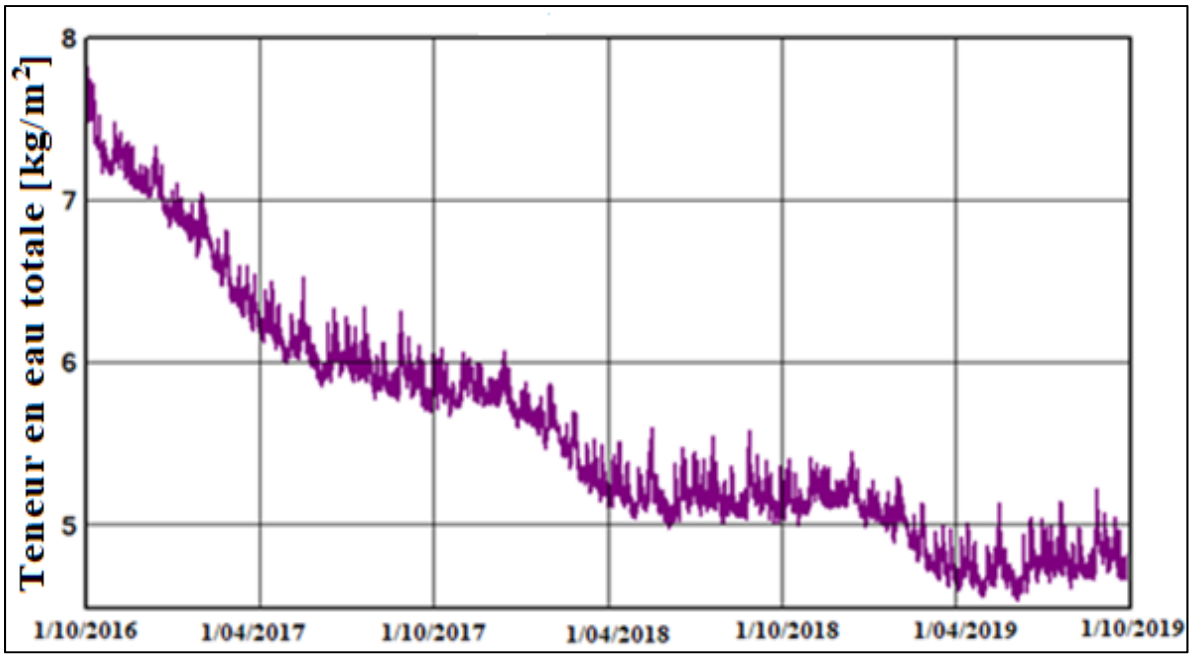


Figure 4.17 Teneur en eau totale du cas 1, WUFI Pro 6.2

Figure 4.18 Teneur en eau du béton de bois côté gauche, cas 1, Lamalle, 2016

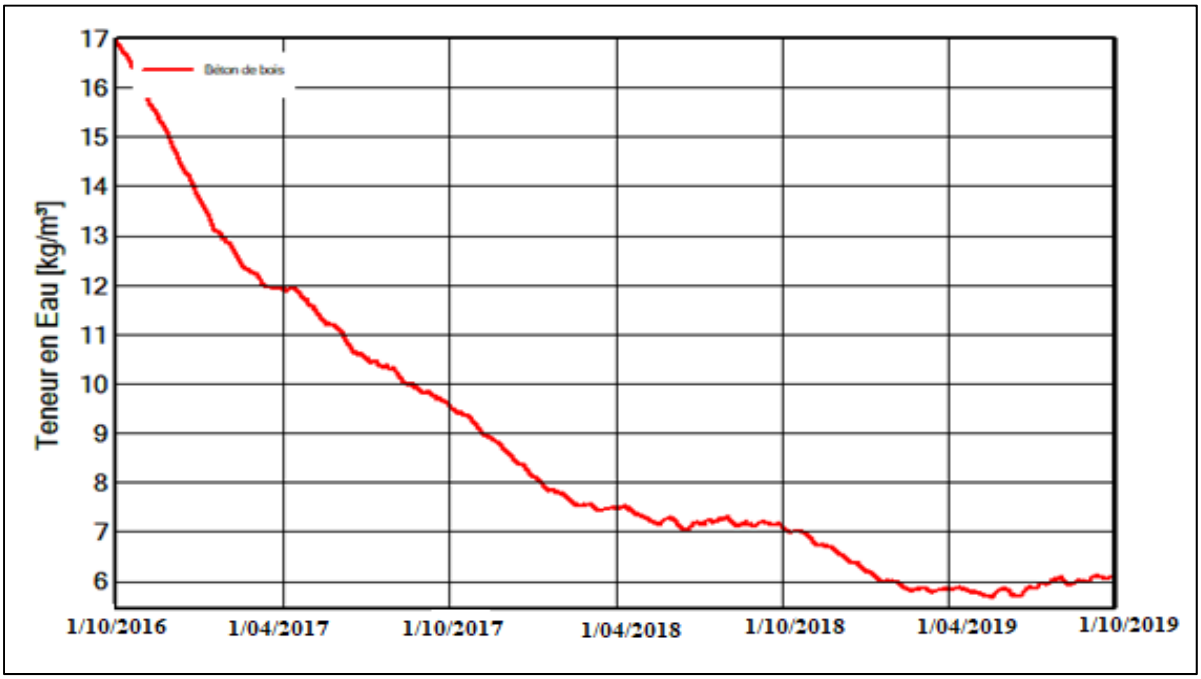


Figure 4.19 Teneur en eau du béton de bois côté gauche, cas 1, WUFI Pro 6.2

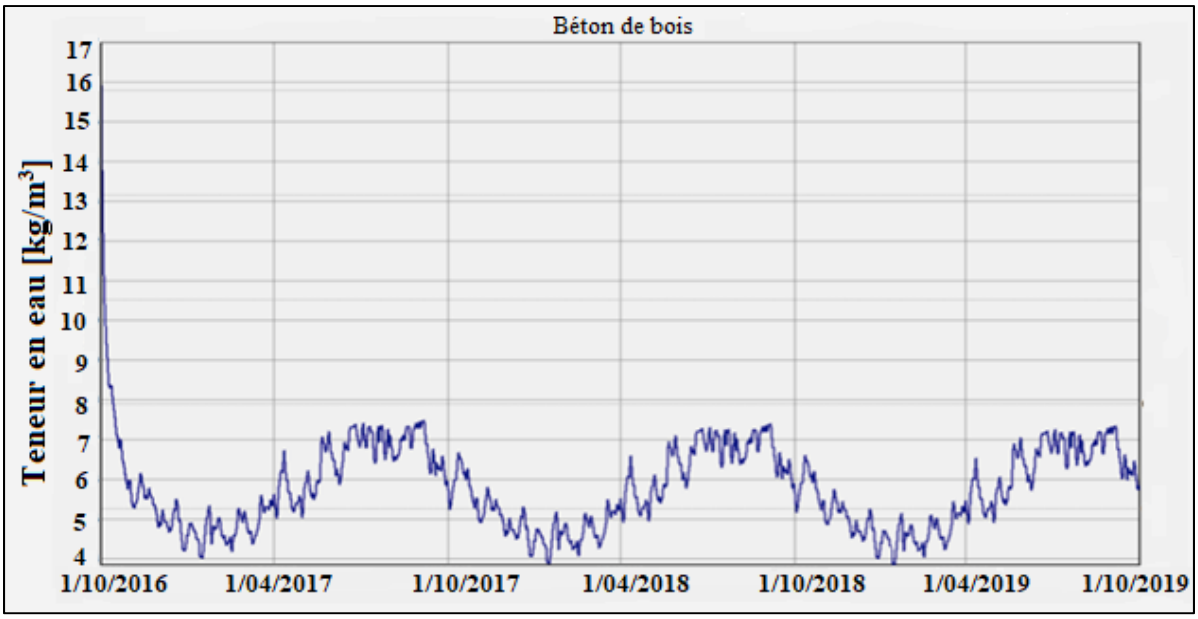


Figure 4.20 Teneur en eau du béton de bois côté droit (vers l'intérieur), cas 1, Lamalle, 2016

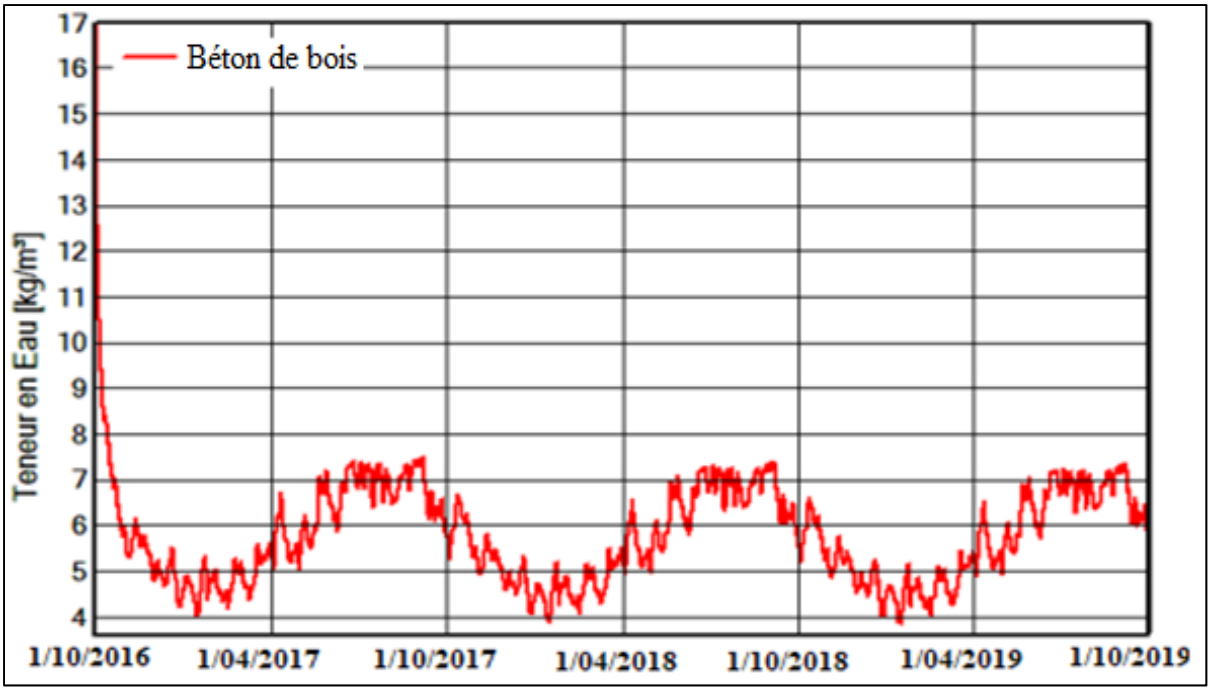


Figure 4.21 Teneur en eau du béton de bois côté droit (vers l'intérieur), cas 1, WUFI Pro 6.2

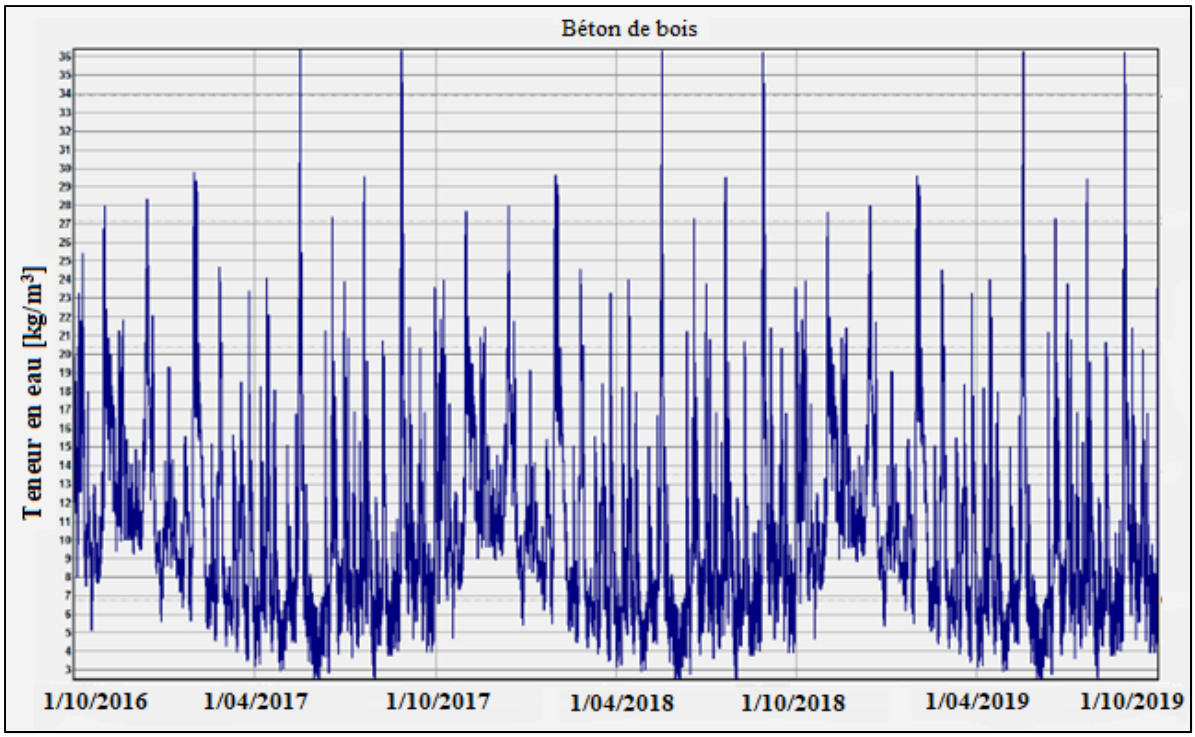


Figure 4.22 Teneur en eau du béton de bois côté extérieur, cas 4, Lamalle, 2016

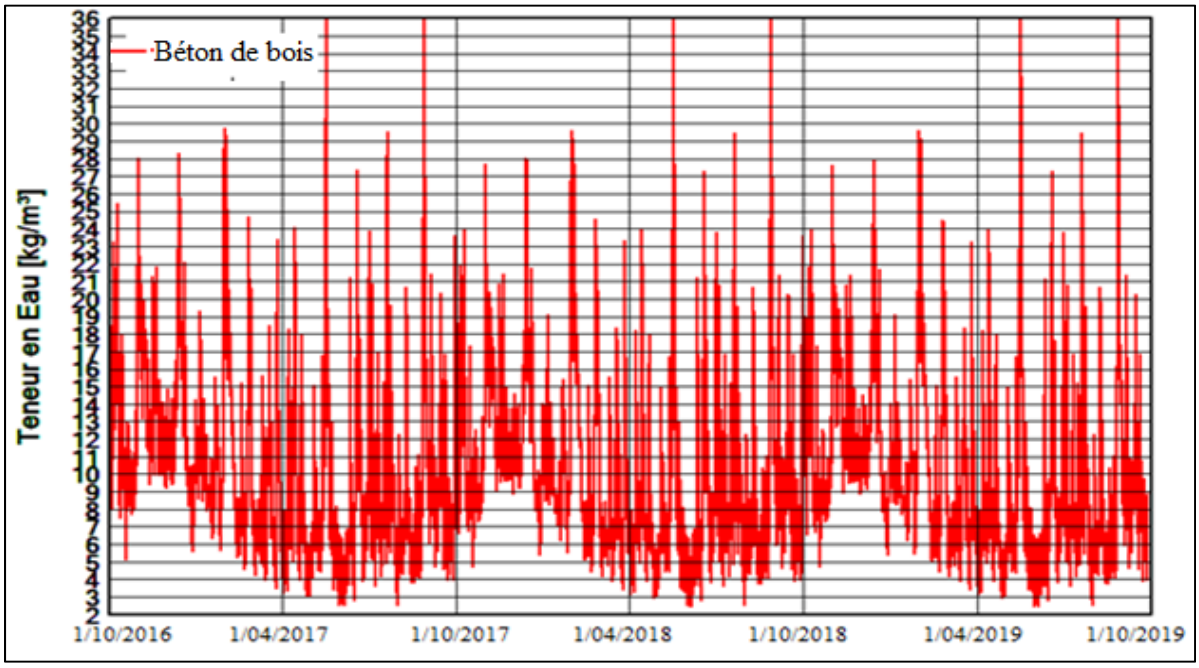


Figure 4.23 Teneur en eau du béton de bois côté extérieur, cas 4, WUFI Pro 6.2

Les figures 4.17, 4.19, 4.21 et 4.23 obtenues par la simulation avec WUFI Pro 6.2 sont similaires aux figures obtenues par la simulation de Lamalle, 2016. Nous pouvons donc conclure que, quelle que soit la version WUFI Pro utilisée pour la simulation des données, on obtient les mêmes résultats.

Conclusion partielle du chapitre 4

Les études de Dahkal, 2017 et de Lamalle, 2016 sont des études menées sur la performance hygrothermique du béton de chanvre et du béton de bois. De ces études, il en ressort que le béton de chanvre et le béton de bois sont des matériaux écologiques pouvant être utilisés dans la construction du fait qu'ils sont performants en termes de régulation de l'humidité intérieure et de la température intérieure. Cependant, une bonne isolation du côté extérieur avec des matériaux plus résistance à l'effet du climat extérieur et le respect des codes de construction s'imposent.

En conclusion pour la vérification du logiciel, nous confirmons l'authenticité des résultats obtenus par WUFI Pro 6.2 et WUFI Pro 5.1 (la version utilisée par Dahkal, 2017 et Lamalle, 2016). Après vérification du logiciel WUFI Pro, nous pouvons commencer à établir les hypothèses, les conditions aux limites et les propriétés hygrothermiques de matériaux utilisées pour la suite de nos travaux. De ce fait, le chapitre 5 fera l'objet de la présentation des hypothèses, des conditions aux limites et les propriétés hygrothermiques des matériaux permettant de faire la simulation avec le logiciel WUFI Pro 6.2.

CHAPITRE 5

MÉTHODOLOGIE ET SIMULATION NUMÉRIQUE DES CAS D'ÉTUDE

Dans le chapitre précédent, le logiciel WUFI Pro 6.2 a été vérifié en confrontant nos résultats à ceux des travaux de deux auteurs utilisant une version antérieure (WUFI Pro 5.1). Ce qui nous conduit à passer à ce chapitre qui fera une approche théorique basée sur la simulation numérique pour étudier la performance hygrothermique du béton de chanvre. De ce fait, la présentation des différentes formulations des bétons de chanvre par trois auteurs, ces propriétés hygrothermiques, les hypothèses, les conditions aux limites et la configuration de la configuration des murs pour la simulation sont présentées. Ces auteurs sont Collet F. (2004), Samri (2008) et Dhakal (2017). L'étude est d'évaluer l'avantage d'utiliser des isolants biosourcés tel que le béton de chanvre dans l'enveloppe du bâtiment en Amérique du Nord et en Afrique de l'Ouest plus précisément au Canada et au Burkina Faso.

5.1 Méthodologie

La simulation consiste à étudier six cas d'enveloppe du bâtiment pour l'ensemble des deux villes choisies. C'est-à-dire trois (03) cas d'enveloppe de bâtiment pour la ville de Montréal et trois (03) cas d'enveloppe de bâtiment pour la ville de Dori. Le calcul de simulation se réalise sur trois ans (du 01/01/2014 au 01/01/2017), ce qui permet d'avoir des valeurs stables à la fin de la simulation et des résultats plus cohérents et satisfaisants. La première année est faite uniquement pour la stabilisation des calculs. Une fois, toutes les données entrées (la configuration des murs, l'orientation des murs pour le calcul, les conditions initiales et aux limites, les propriétés des matériaux, le fichier climatique, etc.) sont introduites dans le logiciel, on peut alors lancer le calcul de simulation. La Figure 5.1 illustre le modèle de configuration de la structure du système ou de l'enveloppe de mur conçu pour la ville de Dori et de Montréal.

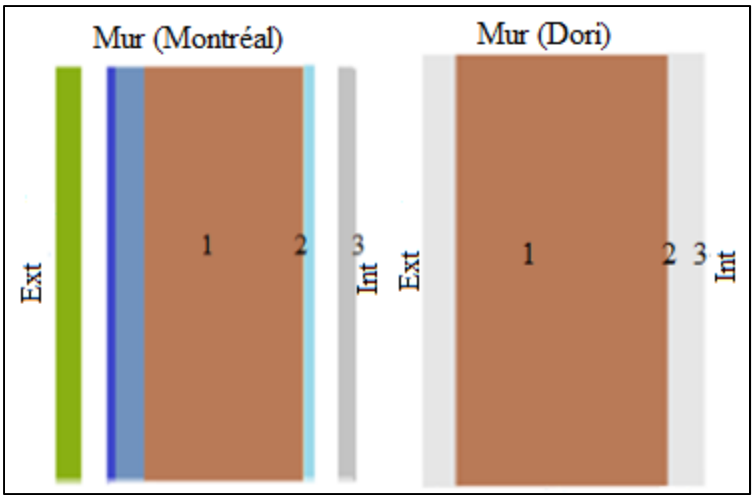


Figure 5.1 Structure d'enveloppe

Par définition :

(1) représente soit l'isolant en laine de verre, soit en béton de chanvre HLC2 ou Mix3;

(2) représente la surface intérieure de chaque isolant;

(3) représente la surface intérieure de chaque mur.

Pour la ville de Montréal, nous avons un mur en laine de verre, un mur en béton de chanvre formulé en France à Lyon et un mur de béton de chanvre formulé au Canada à Toronto. Des taux d'infiltration d'eau de 1 m^3/m^2 h et de 5 m^3/m^2 h (Étanchéité à l'air classe A et C: norme DIN4108) sont introduits dans la couche d'air ventilée des trois (03) murs. Un deuxième processus a été fait en utilisant des fractions de pluie battante de 1 % (norme ANSI/ASHRAE Standard 160) et 5 % (introduite pour augmenter la quantité de pluie battante) à la place des taux d'infiltration d'eau afin d'observer l'influence des deux processus sur la performance hygrothermique des murs. Cette simulation va permettre d'analyser le comportement hygrothermique des deux (02) types de béton de chanvre dans une approche réelle en fonction de l'étanchéité du mur en comparant les résultats obtenus avec les résultats des constructions standard à Montréal. Les scénarios de simulation sont présentés au Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Liste des scénarios de simulation pour la ville de Montréal

Différents scenarios pour la simulation des systèmes de mur de la ville de Montréal au Canada : taux d'infiltration d'eau et des fractions de pluie battante envoyé sur la surface extérieure des murs, caractéristique de la laine de verre, bétons de chanvre voir tableau 4.1 et 5.12		
Cas 1 : mur en laine de verre	Cas 2 : mur en béton de chanvre HLC2 (France)	Cas 3 : mur en béton de chanvre Mix 3 (Canada)
Taux d'infiltration d'eau		
Scenario 1 :1 m^3/m^2 h	Scenario 1 :1 m^3/m^2 h	Scenario 1 :1 m^3/m^2 h
Scenario 2 :5 m^3/m^2 h	Scenario 2 :5 m^3/m^2 h	Scenario 2 :5 m^3/m^2 h
Si la différence entre les résultats pour les scenarios 1 et 2 pour chaque cas sont minimes, continuer la simulation avec des taux d'infiltration d'eau de:		
Scenario 3 :10 m^3/m^2 h	Scenario 3 :10 m^3/m^2 h	Scenario 3 :10 m^3/m^2 h
Scenario 4 :15 m^3/m^2 h	Scenario 4 :15 m^3/m^2 h	Scenario 4 :15 m^3/m^2 h
Scenario 5 :20 m^3/m^2 h	Scenario 5 :20 m^3/m^2 h	Scenario 5 :20 m^3/m^2 h
Fractions de pluie battante		
Scenario 6 :1%	Scenario 6 :1%	Scenario 6 :1%
Scenario 7 :5%	Scenario 7 :5%	Scenario 7 :5%
Si la différence entre les résultats pour les scenarios 1 et 2 pour chaque cas sont minimes, continuer la simulation avec des taux d'infiltration d'eau de:		
Scenario 8 :10%	Scenario 8 :10 %	Scenario 8 :10 %
Scenario 9 :15 %	Scenario 9 :15 %	Scenario 9 :15 %
Scenario 10 :20 %	Scenario 10 :20 %	Scenario 10 :20 %
FIN DE SIMULATION POUR TOUS LES SENARIOS ET ANALYSE DES RESULTATS		

Pour la ville de Dori, nous avons un mur en bloc de ciment, un mur en brique de terre comprimée et un mur en béton de chanvre. Des fractions de rayonnement solaire incident de 1 % et 5 % sont utilisées pour les trois cas de murs de simulation afin d'observer l'influence du rayonnement solaire sur la température intérieure. Ces taux de fraction sont introduits

pour augmenter la quantité de chaleur arrivant sur la surface extérieure des murs. Les scenarios de simulation sont présentés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 Liste des scénarios de simulation pour la ville de Dori

Différents scenarios pour la simulation des systèmes de mur de la ville de Dori au Burkina Faso : des fractions de rayonnement solaire envoyé sur la surface extérieure des murs		
Cas 1 : mur en bloc de ciment	Cas 2 : mur en brique de terre comprimée	Cas 3 : mur en béton de chanvre
Scenario 1 :1%	Scenario 1 :1%	Scenario 1 :1%
Scenario 2 :5%	Scenario 2 :5%	Scenario 2 :5%
Si la différence entre les résultats pour les scenarios 1 et 2 pour chaque cas sont minimes, continuer la simulation avec :		
Scenario 3 :10%	Scenario 3 :10%	Scenario 3 :10%
Scenario 4 :15%	Scenario 4 :15%	Scenario 4 :15%
Scenario 5 :20%	Scenario 5 :20%	Scenario 5 :20%

Les Figures 5.2, 5.3, 5.4 et 5.5 illustrent les matrices de composition de l'enveloppe du mur et les étapes de la simulation.

Méthode de simulation pour la ville de Dori au Burkina Faso.

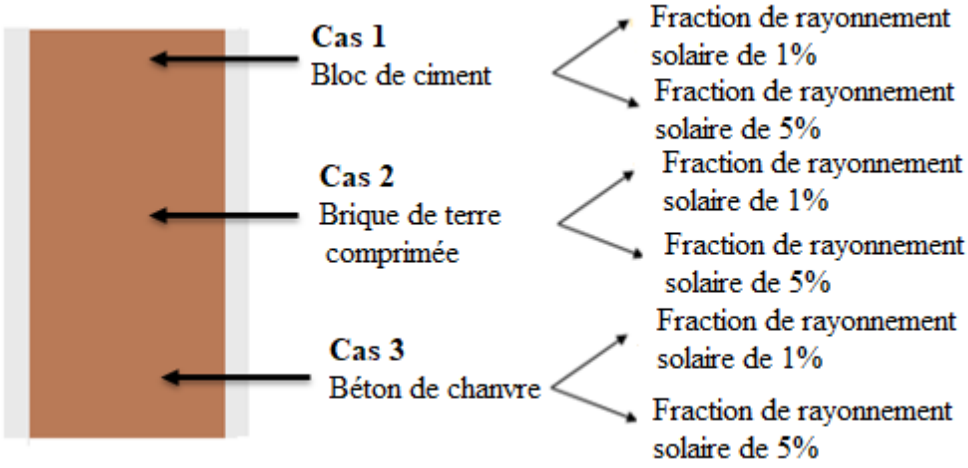
La ville de Dori	L'objectif est de trouver une alternative d'enveloppe de bâtiment permettant de réduire le transfert de chaleur vers l'intérieur.
Scenarios : modèle d'assemblage de mur	

Figure 5.2 Matrice de composition d'enveloppe pour l'étude à Dori au Burkina Faso

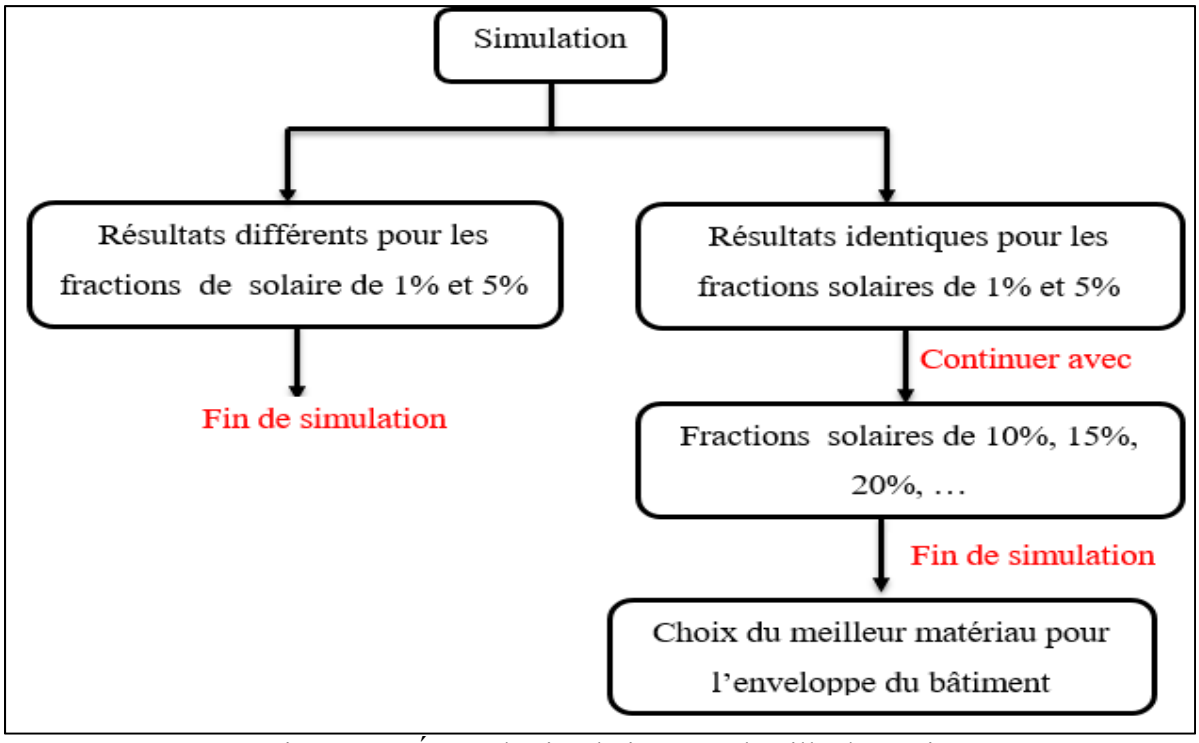


Figure 5.3 Étape de simulation pour la ville de Dori

Méthode de simulation pour la ville de Montréal au Canada.

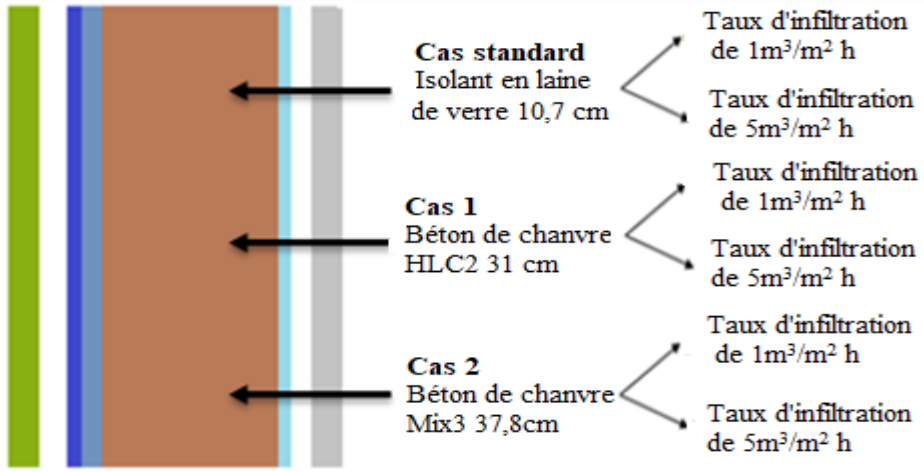
La ville de Montréal	L'objectif est de trouver une alternative d'enveloppe de bâtiment qui a la capacité de réguler l'humidité et la chaleur.
Scenarios : modèle d'assemblage de mur	

Figure 5.4 Matrice de composition d'enveloppe de l'étude pour la ville de Montréal au Canada

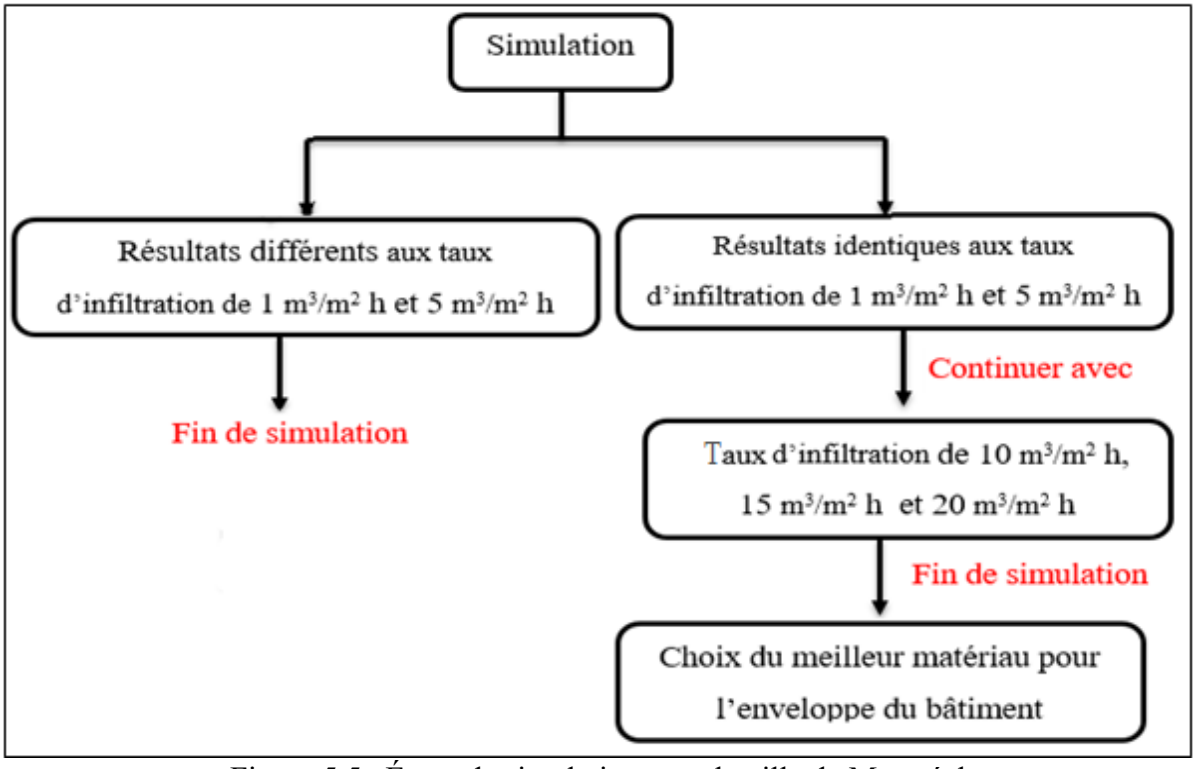


Figure 5.5 Étape de simulation pour la ville de Montréal

L'isolant en laine de verre, le béton de chanvre, le bloc de ciment et la brique de terre comprimée sont représentés à la Figure 5.6.

Figure 5.6 Exemple de matériaux cités dans la conception des murs d'études

Le but ici est de déterminer les murs qui ont un excellent pouvoir de régulation de température. Les résultats du béton de chanvre formulé dans le contexte français, utilisé dans l'assemblage de mur de la ville de Dori sont comparés aux résultats de deux (02) murs typiques de cette même ville avec les mêmes fractions de rayonnement solaire incidentes sur les murs. Dans le contenu de ce document, les résultats sur la teneur en eau totale, la teneur en eau des matériaux principaux, l'humidité relative des murs et des matériaux principaux (bétons de chanvre, laine de verre, bloc de ciment et terre cuite comprimée), la variation de la température intérieure des murs et des matériaux principaux, le risque de condensation sont présentés et commentés. Le reste des résultats (résumé des calculs, les courbes sur le risque de moisissure, le flux de chaleur, la transmission thermique, les profils de température,

d'humidité et de la teneur en eau en fonction de l'épaisseur de chaque mur sont présentés à l'annexe II (page 178).

5.1.1 Objectif de l'étude et intégration du béton de chanvre dans l'enveloppe du bâtiment

L'objectif principal de l'étude est d'évaluer l'avantage de l'utilisation des isolants biosourcés tel que le béton de chanvre introduit dans l'enveloppe du bâtiment en Amérique du Nord et en Afrique de l'Ouest plus précisément au Canada et au Burkina Faso respectivement. Cela nous amène à analyser la performance hygrothermique du béton de chanvre dans les différents assemblages d'enveloppe du bâtiment. Étant un matériau écologique ayant un potentiel de développement économique élevé pour l'avenir, son utilisation contribue à la préservation des ressources naturelles ainsi que la limitation des émissions des GES, par le stockage de carbone de l'atmosphère. Cela fait partie d'une démarche de développement durable.

En effet, l'étude consiste à effectuer des calculs de transfert couplés de chaleur-humidité à travers les matériaux que constitue l'enveloppe du bâtiment dont le matériau principal est le béton de chanvre par simulation avec le logiciel WUFI Pro 6.2. Dans cette étude, les bétons de chanvre utilisés sont formulés par (Samri, 2008) et par (Dhakal, 2017). Ces deux bétons de chanvre sont utilisés dans la conception des différents murs de l'étude pour la ville de Montréal. Le béton de chanvre formulé par (Samri, 2008) selon le contexte français a été utilisé pour la conception des murs d'étude pour la ville de Dori.

5.1.2 Méthode de formulation du béton de chanvre et de sa composition

5.1.2.1 Béton de chanvre formulé par Collet F., 2004

Deux bétons de chanvre A et B ayant la même formulation, des caractéristiques similaires et de technique de séchage diffèrent ont été utilisés par (Collet F., 2004) pour ses travaux

effectués à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes en France. Le séchage du béton de chanvre A a été effectué dans une étuve à température de 70°C à 5 % HR tandis que le béton de chanvre B a été séché au gel de silice. Le Tableau 5.1 présente les données utilisées pour la formulation des deux bétons de chanvre.

Tableau 5.3 Composition des bétons de chanvre A et B
Tiré de Collet F. (2004, p.45)

Composition des bétons de chanvre	Béton	
	A	B
Chaux : Tradical PF70	11 litres	
Chènevotte chanvribat	48 litres	
Eau	16 litres	
Méthode séchage	Séchage à étuve à 70°C et 5%HR	Séchage au gel de silice
Arête des échantillons [cm]	20 ; 10 ; 5 ; 2,5	20 ; 10 ; 5 ; 2,5
Densité [kg/m^3]	390	425

5.1.2.2 Béton de chanvre formulé par Samri Driss, 2008

Deux bétons de chanvre d'usage type enveloppe du bâtiment ont été étudiés pour la ville de Lyon en France par (Samri, 2008). La composition massique et volumique et la densité des deux bétons de chanvre nommés HLC1 et HLC2 à l'état sec sont données au Tableau 5.2. Le séchage a été effectué à une température de 80°C dans une étuve de laboratoire pendant cinq jours. Les 80°C représentent la température normale pour le séchage (Samri, 2008). La limite de la température de séchage du béton de chanvre doit être inférieure à 90°C pour éviter le risque de modification de la structure des particules végétales (Samri, 2008). La Figure 5.7 illustre la méthode de séchage utilisée pour sécher le béton de chanvre.

Figure 5.7 Séchage à l'étuve
Tirée de Niyigena (2016, p.153)

Le calcul de la porosité totale a été effectué en deux étapes :

1. Par essais à l'aide d'un porosimètre à mercure;
2. Par calcul, la porosité totale du béton sec est égale à la somme de l'air macroscopique due à l'arrangement imparfait des particules et de l'aire microscopique contenu dans la chènevotte et dans le liant. Il a été noté que le rapport (quantité de liant/quantité de chènevotte) pour les deux bétons vaut 1,6.

Tableau 5.4 Composition de deux bétons de chanvre HLC1 et HLC2
Tiré de Samri (2008, p. 41)

Composition	HLC1			HLC2		
	Volume (m^3)	Masse (kg)	%	Volume (m^3)	Masse (kg)	%
Air	0,715	0	0	0,79	0	0
Chaux : Tradical PF70	0,174	266,6	62	0,12	190	59,94
Chènevotte	0,111	163,4	38	0,09	127	40,06
Mode de séchage	80°C pendant cinq jours dans une étuve					
Masse volumique	430 kg/m^3		100	317 kg/m^3		100

5.1.2.3 Béton de chanvre formulé par Dhakal, 2017

Trois types de béton de chanvre d'usage type enveloppe du bâtiment pour la ville d'Ontario au Canada ont été présenté par (Dhakal, 2017). La composition massique et volumique de ces bétons de chanvre nommés Mix 1, Mix 2 et Mix 3 à l'état sec est donnée par le Tableau 5.3. Le séchage a été effectué en un premier temps à une température ambiante pendant 26 jours, ensuite dans un four à une température de 1100℃. Et les tests ont été effectués selon les normes ASTM C67-14 et ASTM C62-13a.

Tableau 5.5 Composition des bétons de chanvre Mix1, Mix2 et Mix3
Tiré de Dhakal (2017, p. 60)

Composition	Mix 1		Mix 2		Mix 3	
	Masse [g]	%	Masse [g]	%	Masse [g]	%
Chènevotte	5030	28	4994	22	4010	17
Chaux : liant Batichanvre	5012	28	7502	33	8002	35
Eau	8000	44	10 500	46	11 000	48
Mode de séchage des bétons	26 jours de séchage naturel en un premier temps et ensuite séchage par four pendant 24 heures à une température de 1100℃					
Masse en fin de séchage	233 kg/m^3		317 kg/m^3		388kg /m^3	

5.1.3 Propriétés hygrothermiques des bétons de chanvre de (Collet, 2004), de (Samri, 2008) et (Dhakal, 2017)

La détermination de la teneur en eau à 80 % HR, la saturation en eau libre et la teneur en eau maximale des bétons de chanvre (Tableau 5.6 et 5.7) ont été effectués en se basant sur les données du tableau 5.9 établi par Dhakal (2017).

Tableau 5.6 Valeur de teneur en eau à 80%HR, saturation en eau libre et maximale calculée à partir des données de (Collet, 2004) et de (Samri, 2008)

Auteur	Collet, 2004		Samri, 2008		Référence et méthode de calcul
Type de béton	Béton A	Béton B	Béton HLC1	Béton HLC2	
Masse volumique [kg/m^3]	390	425	430	317	
Teneur en eau 80%HR [kg/m^3]	29,25	31,88	32,25	23,77	Tableau 5.9 (7,5 % mass)
Saturation en eau libre [kg/m^3]	483,6	527	533,2	393,08	Tableau 5.9 (124%mass)
Teneur en eau max [kg/m^3]	659,1	705,5	713,8	526,22	Tableau 5.9 (166%mass)

Tableau 5.7 Valeur de l'humidité typique de construction des bétons de chanvre calculé à partir des données de (Collet, 2004), de (Samri, 2008) et de (Dhakal, 2017)

Auteur	Collet, 2004		Samri, 2008		Dhakal, 2017
Type de béton	Béton A	Béton B	Béton HLC1	Béton HLC2	Mix 3*
Masse volumique [kg/m^3]	390	425	430	317	388
Humidité typique de construction (teneur en eau volumique) [kg/m^3]	282	247	242	355	286

L'humidité typique de construction ou teneur en eau volumique se calcule en faisant la soustraction de la teneur en eau volumique du matériau à l'état humide par la teneur en eau du matériau en l'état sec.

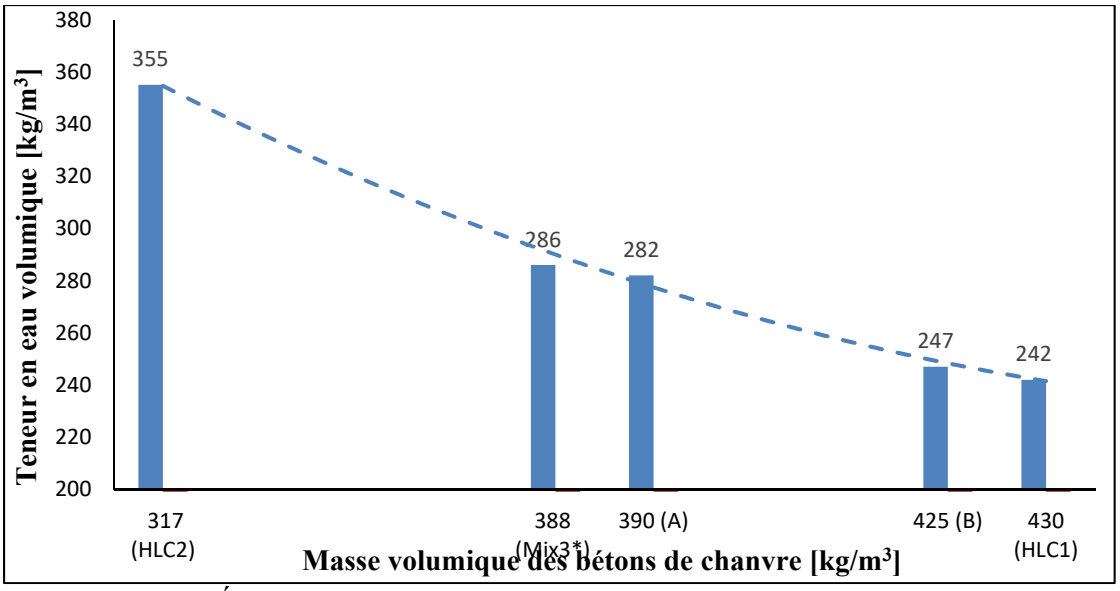


Figure 5.8 Évolution de la teneur en eau volumique en fonction de la masse des bétons de chanvre

La Figure 5.8 montre que la valeur de la teneur en eau volumique du béton de chanvre varie en fonction de sa masse volumique à l'état sec. Elle diminue avec l'augmentation de la masse volumique du matériau. L'humidité typique de construction est définie comme la vapeur d'eau massique que l'enveloppe du bâtiment peut stocker sans risque de condensation. La Figure 5.8 montre que le béton de chanvre a la capacité de stocker plus de vapeur d'eau lorsque sa masse volumique faible. Le béton de chanvre de 317 kg/m^3 d'accumuler une teneur en eau de 355 kg/m^3 contrairement au béton de chanvre de 430 kg/m^3 qui stocke que 242 kg/m^3. Cela se justifie par la présence de plus pore pour les bétons ayant une petite masse volumique que les bétons ayant une grande masse volumique.

Après l'analyse des différents bétons de chanvre avec le logiciel WUFI Pro 6.2 en faisant des simulations préliminaires avec les données disponibles, le choix des bétons de chanvre les mieux adaptés à la zone de Montréal est maintenant possible. Le béton de chanvre HLC2 formulé par (Samri, 2008), dans le contexte français et le béton de chanvre Mix3 formulé par (Dahkal, 2017) dans le contexte canadien ont été retenues. Le Tableau 5.8 présente les données des bétons de chanvre HLC2 et Mix3 retenu pour la simulation.

Tableau 5.8 Résumé des données des bétons de chanvre utilisés dans l'étude

Type de béton (Samri, 2008 et Dahkal, 2017)	Béton HLC2	Mix 3
Masse volumique [kg/m^3]	317	388
Humidité type de construction [kg/m^3]	355	286
Teneur en eau à 80%HR [kg/m^3]	23,77	29
Saturation libre [kg/m^3]	393,08	424
Teneur en eau max [kg/m^3]	526,22	655

Par définition, la teneur en eau à 80 % est la quantité d'eau absorbée par un matériau à une humidité de 80 % tandis que la saturation en eau libre est définie comme la quantité d'eau absorbée par un matériau à une humidité de 100 %. La teneur en eau maximale est la teneur en eau à saturation totale, c'est l'état dans lequel la structure poreuse du matériau est complètement remplie d'eau (Dhakal, Berardi, Gorgolewski, & Richman, 2017). Le Tableau 5.9 présente la récapitulation des propriétés hygrothermique et mécanique du béton de chanvre.

Tableau 5.9 Tableau de référence résumant les propriétés des bétons de chanvre
Tiré de Dhakal, Berardi, Gorgolewski, & Richman (2017, p, 47)

Propriétés	Unité	(Min-Max)	Gamme de valeur acceptée
Masse volumique à l'état sec (ρ_o)	kg/m^3	220-627	300-500 (mur)
Porosité (φ) (W_{max}/ρ_{eau})	m^3/m^3	0,71-0,84	0,71-0,73
Chaleur spécifique à l'état sec (C)	J/kg K	1000-1700	1500-1600
Conductivité thermique à l'état sec (k_o)	W/m K	0,06-0,13	0,06-0,12
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur à l'état sec (μ_o) $s_d = \mu_d$, $\delta_0 = \delta_0/\mu_0$	(-)	3,59-7,68	4,84-4,85
Valeur tampon d'humidité (MBV) [$\Delta m/A(RH_{haut} - RH_{faible})$]	g/ (m^2 % HR)	2,11-2,14	2,11-2,14
Diffusivité thermique (α) ($k_o/\rho_o C_o$)	m^2/s	(1,48-1,68) 10^{-7}	(1,48-1,68) 10^{-7}

Tableaux 5.9 (suite)

Propriétés	Unité	(Min-Max)	Gamme de valeur acceptée
Effusivité thermique (E) $(k_o\rho_oC_o)^{½}$	$J/m^2\ K\ s^{-1/2}$	286-297	286-297
Amortissement	%	98,5	98,5
	Décalage du temps	15	15
Étanchéité à l'air	m^3/hm^2@50Pa	1,2-2	1,2-2
Sécurité d'incendie	Heure	1,22-1,67	1,22-1,67
Saturation en eau libre (W_S)	kg/m^3	546–596 (124%mass)	124 % mass
Teneur en eau à 80%HR (W_{eau}80%HR)	kg/m^3	33–36 (7,5 %mass)	7,5 % mass
Teneur en eau maximale (W_{max}) (φ*ρ_{eau})	kg/m^3	711-843	166%mass
Conductivité thermique supplémentaire (b)* $[\rho_o\ (k - k_o)/k_o w]$	%/% mass	2,73–3,34	3,34
Coefficient d'absorption liquide $[(\sigma/SA) * 1000)]$	$kg/m^2s^{-1/2}$	0,044-0,15	0,074
Coefficient de saturation (W_s/W_{max})	(–)	0,75-0,84	0,75-0,84
Séquestration du carbone	$kgCO_2/m^3$	(-) 108 - (-) 133	(-) 108 - (-) 133
Résistance à la compression	MPa	0,05-3,5	0,05-0,35
Valeur R		R2-3/inch	R2-2,5/inch

(*) La Conductivité thermique supplémentaire [% / % masse] quantifie l'augmentation de la conductivité thermique lorsque la teneur en eau augmente de 1 % par rapport à la masse sèche (Dhakal, Berardi, Gorgolewski, & Richman, 2017).

Le Tableau 5.10 présente les propriétés hygrothermiques des bétons de chanvre de (Samri, 2008) et (Dhakal, 2017) qui seront utilisés pour la suite de la simulation avec le logiciel WUFI Pro 6.2.

Tableau 5.10 Propriétés hygrothermiques des bétons de chanvre utilisés pour l'étude établie en utilisant les données du béton de chanvre de (Samri, 2008) et (Dhakal, 2017)

Propriétés hygrothermiques	Valeur		Référence
Auteur	Dahkal, 2017	Samri Driss, 2008	
Béton de chanvre	Mix 3	HLC2	
Masse volumique à l'état sec [kg/m^3]	388	317	_
Porosité du matériau [%]	66	79	_
Chaleur spécifique état sec [J/kg K]	1560	1000	_
Conductivité thermique à état sec [W/m K]	0,1	0,082	_
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur à état sec	4,85	3,6	_
Supplément de conductivité thermique dépendante de l'humidité [% / % mass]	3,34	3,34	Tableau 4.7 établie par Dahkal, 2017
Teneur maximale en eau [kg/m^3]	424	393	Dahkal, 2017
Saturation en eau libre en [kg/m^3]	655	526	Tableau 4.7 établie par Dahkal, 2017
Teneur en eau à 80 % HR en [Kg/m^3]	29	23,77	Tableau 4.7 établie par Dahkal, 2017
Coefficient d'absorption liquide	0,074	0,074	Dahkal, 2017
Humidité typique de construction [kg/m^3]	286	355	Densité humide figure 1.24 p.38

Les données du béton de chanvre de ces deux auteurs ont été choisies parce que leurs travaux présentent les données du béton de chanvre nécessaire pour une simulation hygrothermique.

5.2 Simulations

5.2.1 Limitations

Cette étude purement académique donne uniquement une idée théorique du comportement de l'enveloppe du bâtiment vis-à-vis du climat extérieur pour chaque composante. WUFI Pro 6.2 ne traite pas les écoulements d'air, car ce n'est pas un logiciel de CFD (Computational Fluid Dynamic). Des études de laboratoire n'ont pas été réalisées pour caractériser le béton de chanvre dans le contexte canadien et dans le contexte burkinabé et les simulations ne sont pas non plus validées expérimentalement. De ce fait, les données des bétons de chanvre utilisées pour l'étude proviennent des travaux de (Samri, 2008), contexte français et (Dhakal, 2017), contexte canadien. Certaines données de (Niyigena, 2016a) ont été utilisés pour le calcul de l'humidité typique de construction. Pour pouvoir passer à la simulation numérique, plusieurs hypothèses ont été émises.

5.2.2 Hypothèses de base pour les parois d'études

Les hypothèses prises en compte pour la simulation sont les suivantes :

- Il n'y a pas infiltrations d'eau dans le mur, sauf celle due à la pluie battante ;
- Les simulations considèrent que l'étanchéité à l'air est bien réalisée et qu'il n'y a pas de convection entre l'isolant et le mur ni de transport convectif d'humidité du local vers l'extérieur à travers le mur.

5.2.3 Condition aux limites

Les conditions aux limites sont fixées en fonction du climat intérieur et extérieur de la ville de Montréal et de Dori. La ville de Montréal possède une fiche climatique dans la base de données WUFI Pro 6.2. Cette fiche climatique a été utilisée. Quant aux données climatiques de la ville de Dori, la fiche climatique a été générée à l'aide des données climatiques

obtenues par l'agence nationale de la météorologie de Ouagadougou. Ces données contiennent des données climatiques relevées en chaque 15 minutes. Les données ont été analysées et traitées afin d'obtenir des données en heures utilisables par WUFI Pro 6.2. Après avoir obtenu toutes les données nécessaires pour l'étude, les aperçus des profils de température extérieure, d'humidité extérieure (pour la ville de Montréal), du rayonnement et de la pluie battante ont été obtenus par le logiciel WUFI Pro 6.2. L'annexe II (page 161) montre en détaille les neuf (09) conditions aux limites illustrées ci-dessous avec des figures obtenues après le choix de la zone d'étude et des données climatiques pour la simulation des murs d'étude.

1- Orientation du mur : sud-ouest pour Montréal et Sud-est pour Dori, ces orientations ont été choisies pour maximiser l'exposition au soleil et attente de pluie (pire cas de pluie battante et d'exposition au soleil). La quantité de pluie est calculée selon la norme ASHRAE 160 (FE=1.4 et FD=0,5);
2- État initial : 20℃ et 80 % (constante dans la composante) [Montréal et Dori];
3- Coefficients surfaciques d'absorption = 0,4 et d'émissivité = 0,9 pour un enduit normal clair;
4- Facteur d'absorption d'eau de pluie = 0,7;
5- Pas de revêtement de surface;
6- Un taux d'infiltration d'eau de 1 m^3/m^2 h et 5 m^3 /m^2 h pour la couche d'air ventilée de l'assemblage de mur de Montréal. Une deuxième condition est d'introduire une fraction de pluie battante de 1 % et de 5 % selon ASHRAE Standard 160-2009 sur les murs extérieurs de chaque cas et observer l'influence de l'infiltration d'eau et la fraction de pluie battante sur la teneur en eau totale et l'humidité relative des différents assemblages de murs. Pour la ville de Dori; il est question de transfert de chaleur dont une fraction de rayonnement solaire incident de 1 % et 5 % est envoyé au mur extérieur afin d'observer la quantité de chaleur qui arrive à traverser chaque mur. Ensuite, le mur dont le transfert de chaleur est faible est alors utilisé avec des fractions de rayonnement solaire incident 10 % ,15 % et 20 %;

7- Période de simulation : 3 ans afin de permettre d'obtenir des résultats satisfaisants et stables (du 01/01/2014 au 01/01/2017) ; cette période a été choisie pour respecter la disponibilité des données climatiques obtenues pour la ville de Dori au Burkina Faso;
8- Environnement extérieur : fiches climatiques de la ville de Montréal et de Dori utilisés. L'indice moyen des nuages : 0,64 pour Montréal (analyse des fichiers climatiques par WUFI Pro 6.2) et par défaut du logiciel (0,66) pour la ville de Dori (dû au manque de donnée sur l'indice des nuages pour cette ville);
9- Environnement intérieur : Température: 21,1°C ± 1,8°C (point de départ chauffage), 23,9°C ± 1,8°C (point de départ refroidissement) et RH 50 % (Montréal) (CNEB, 2019; Paméla NOËL, 2018) et 24°C± 2,8°C (Dori) [sans chauffage].

5.2.4 Composition des murs d'étude

Les Tableaux 5.11 et 5.12 décrivent la composition de chaque mur ainsi que l'épaisseur de chaque composant des deux villes choisies pour l'étude.

Tableau 5.11 Composition de chaque enveloppe de bâtiment étudiées dans WUFI Pro 6.2 pour la ville de Montréal

Cas standard : mur en laine de verre	Cas 1 : mur en béton de chanvre HLC2	Cas 2 : mur en béton de chanvre Mix 3
Épicéa (bois) 2 cm	Épicéa 2 cm	Épicéa 2 cm
Lame d'air 2 cm	Lame d'air 2 cm	Lame d'air 2 cm
Pare-intempérie (Tyvex) 0,1 cm	Pare-intempérie (Tyvex) 0,1 cm	Pare-intempérie (Tyvex) 0,1 cm
Polystyrène expansé 2,5 cm	Polystyrène expansé 2,5 cm	Polystyrène expansé 2,5 cm
Laine de verre 10,7 cm	Béton de chanvre HLC2 31 cm	Béton de chanvre Mix 3 37,8 cm
Pare- vapeur (plastique) 1 perm*	Pare- vapeur (plastique) 1 perm*	Pare- vapeur (plastique) 1 perm*
Lame d'air 2 cm	Lame d'air 2 cm	Lame d'air 2 cm
Plaque de plâtre 1,25 cm	Plaque de plâtre 1,25 cm	Plaque de plâtre 1,25 cm

(*) Le pare-vapeur a une valeur au Canada au plus de 60 ng/Pa s m^2. Aux USA 1 perm vaut 57 ng/Pa s m^2.

Le tableau 5.12 présente tous les matériaux utilisés dans la base de données WUFI Pro 6.2 ainsi que leur propriété hygrothermique.

Tableau 5.12 Propriétés des composants de l'enveloppe pour la ville de Montréal

Nom de la couche	Matériau dans la base de données	Masse volumique [kg/m^3]	Porosité [m^3/m^3]	Conductivité thermique [W/mK]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Résistance à la diffusion [-]
Épicéa	Épicéa (bois)	400	0,900	0,008 6	1880	552
Brique de terre cuite	Brique terre-cuite alvéolée	600	0,770	0,12	850	16
Lame d'air	Lame d'air 20 mm	1,3	0,999	0,13	1000	0,56
Pare-intempérie	Pare-vent / pare pluie (sd=0, 1 m)	130	0,001	2,3	2300	100
Polystyrène expansé	Isolation en polystyrène expansé	14,8	0,990	0,036	1470	73,01
Laine de verre	Laine de verre	30	0,990	0,035	840	1,3
Béton de chanvre HLC2	Béton de chanvre HLC2	317	0,790	0,082	1000	3,6
Béton de chanvre	Béton de chanvre Mix 3	388	0,660	0,1	1560	4,85
Pare-vapeur	Freine vapeur	130	0,001	2,3	2300	1000
Plaque de plâtre	Plaque de plâtre	625	0,706	0,16	870	7,03

Les valeurs en rouge représentent les valeurs des deux bétons de chanvre entrés manuellement dans la base des données WUFI Pro 6.2 pour la simulation et les valeurs en

noir sont les propriétés des matériaux choisis directement dans la base des données WUFI Pro 6.2.

Tableau 5.13 Résumé des valeurs de la résistance thermique (RSI/R) pour chaque mur et isolant, de la transmission thermique U et de l'épaisseur totale de chaque cas obtenu par le logiciel WUFI Pro 6.2

Cas d'étude	Épaisseur totale [m]	Valeur RSI des matériaux principaux [m^2K/W]	Valeur RSI du mur [m^2K/W]	Valeur R du mur [m^2K/W]	U du mur [W/m^2K]
Cas standard 1 et 2	0,207	3,05	4,35	24,7	0,229
Cas 1 et 3	0,41	3,05	4,35	24,7	0,229
Cas 2 et 4	0,478	3,05	4,35	24,7	0,229

Le Tableau 5.13 présente le résumé des valeurs de la résistance thermique (RSI/R) pour chaque mur et isolant, transmission thermique U et l'épaisseur totale de chaque cas. Le calcul de la résistance thermique RSI et R, de la transmission thermique U sont fait par les relations suivantes : U= 1/RSI et R= RSI*5,6789 justifier par les travaux de (Gilbert Riopel & Marie-France Bélec, 2016) sur la résistance thermique effective et les impacts des ponts thermiques. La valeur RSI est obtenue par le logiciel WUFI Pro 6.2. La valeur RSI de la laine de verre, du béton de chanvre HLC2 et du béton de chanvre Mix 3 sont identique du fait que chaque mur a les mêmes matériaux qui recouvrent la laine de verre, le béton de chanvre HLC2 et Mix3. Le Tableau 5.14 présente la composition de chaque mur ainsi que l'épaisseur de chaque composant utilisé pour la simulation de la ville de Dori au Burkina Faso.

Tableau 5.14 Composition de chaque enveloppe de bâtiment étudiée dans WUFI Pro 6.2 pour la ville de Dori au Burkina Faso

Cas 1 : mur en bloc de ciment	Cas 1 : mur en brique de terre comprimée	Cas 2 : mur en béton de chanvre
Crépi 1 cm Bloc de ciment 23 cm Crépi 1 cm	Crépi 1 cm Brique de terre comprimée 23 cm Crépi 1 cm	Crépi 1 cm Béton de chanvre HLC2 23 cm Crépi 1 cm

L'épaisseur des murs de construction typique au Burkina Faso est de 25 cm au maximum, dont un crépi du côté extérieur et intérieur. Tous les cas ont pour épaisseur 25cm, un crépi du côté extérieur et intérieur, identique à une construction typique du Burkina Faso.

Tableau 5.15 Propriétés des composants de l'enveloppe pour la ville de Dori

Nom de la couche	Matériau dans la base de données	Masse volumique [kg/m^3]	Porosité [m^3/m^3]	Conductivité thermique λ [W/mK]	Chaleur spécifique C [J/kgK]	Résistance à la diffusion [-]
Crépi	Enduit de ciment	2000	0,3	1,2	850	25
Bloc de ciment	Béton E/C=0,5	2300	0,18	1,6	850	180
Béton de chanvre HLC 2	Béton de chanvre HLC 2	317	0,79	0,085	1000	3,6
Brique de terre comprimée	Brique de terre comprimée	2100	0,24	0,8	1732	10
Peinture	Enduit de chaux	1600	0,3	0,7	850	7
Lame d'air	Lame d'air	1,3	0,999	0,071	1000	0,73

Le Tableau 5.15 présente les propriétés de tous les matériaux utilisés dans la base de données WUFI Pro 6.2. Les valeurs en rouge représentent les valeurs entrées manuellement dans la

base des données WUFI Pro 6.2 pour la simulation et les valeurs en noir sont les propriétés des matériaux choisis directement dans la base des données WUFI Pro 6.2.

Conclusion partielle du chapitre 5

Les propriétés des matériaux, les hypothèses et les conditions aux limites présentées dans le chapitre 5 sont utilisées pour la simulation numérique par le logiciel WUFI Pro 6.2 et les résultats de cette simulation sont présentés dans le chapitre suivant. Après l'établissement des assemblages des enveloppes du bâtiment pour les deux villes d'étude, ces enveloppes ont été configurées dans le logiciel WUFI Pro 6.2 avec toutes ces composantes. Les résultats obtenus à la fin de la simulation sont présentés dans le chapitre 6.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente les résultats de la simulation des cas de murs des deux villes présentées au chapitre 5. Le comportement hygrothermique des murs en béton de chanvre sera comparé au comportement hygrothermique des murs des constructions standards pour la ville de Montréal au Canada et les murs de constructions typiques pour la ville de Dori, au Burkina Faso. Une discussion est alors faite sur le risque de condensation pour la zone climatique de Montréal et sur la performance thermique du béton de chanvre pour la zone de Dori.

6.1 Résultats

Une animation est proposée par WUFI Pro 6.2 lorsqu'on lance les calculs (simultané ou individuel), permettant de visualiser les courbes de température, d'humidité relative, de la teneur en eau etc. à travers les murs. La simulation est basée sur une condition plus sévère (exposition du mur à la pluie battante et au soleil). Les Figures 6.1 et 6.3 présentent la configuration des murs et du maillage de l'enveloppe du bâtiment du cas standard et du cas 1 dans le logiciel WUFI Pro 6.2. Les Figures 6.2 et 6.4 sont les animations obtenues à la fin de la simulation pour l'année 01/01/2017.

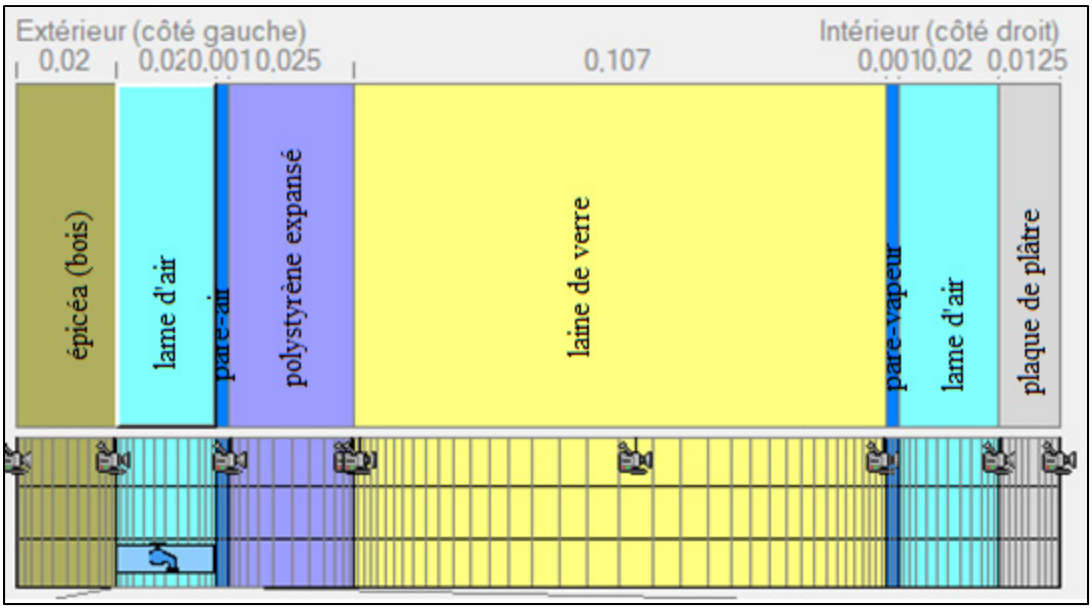


Figure 6.1 Configuration du mur et maillage du cas standard dans WUFI Pro 6.2 pour la ville de Montréal

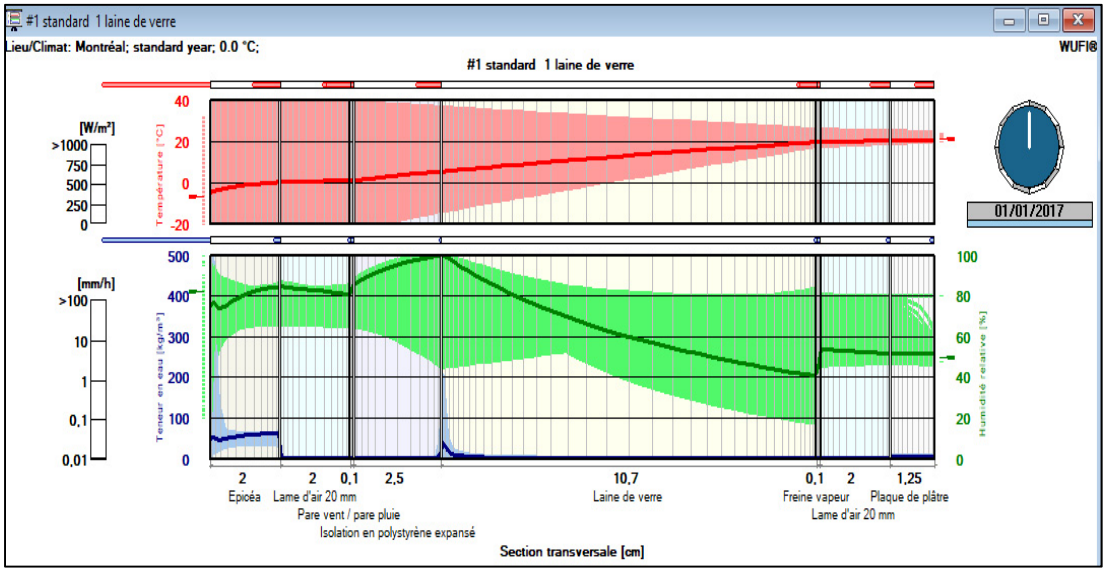


Figure 6.2 Animation du cas standard 1 pour le taux d'infiltration d'eau de $1m^3/m^2h$, ville de Montréal

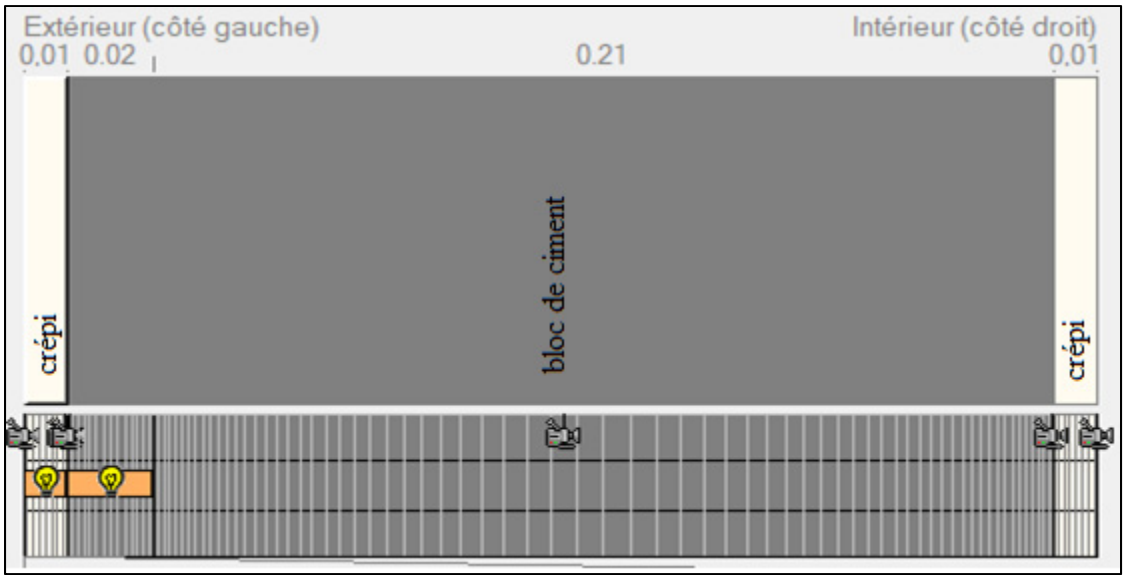


Figure 6.3 Configuration du mur et maillage du cas 1 dans WUFI Pro 6.2 pour la ville de Dori

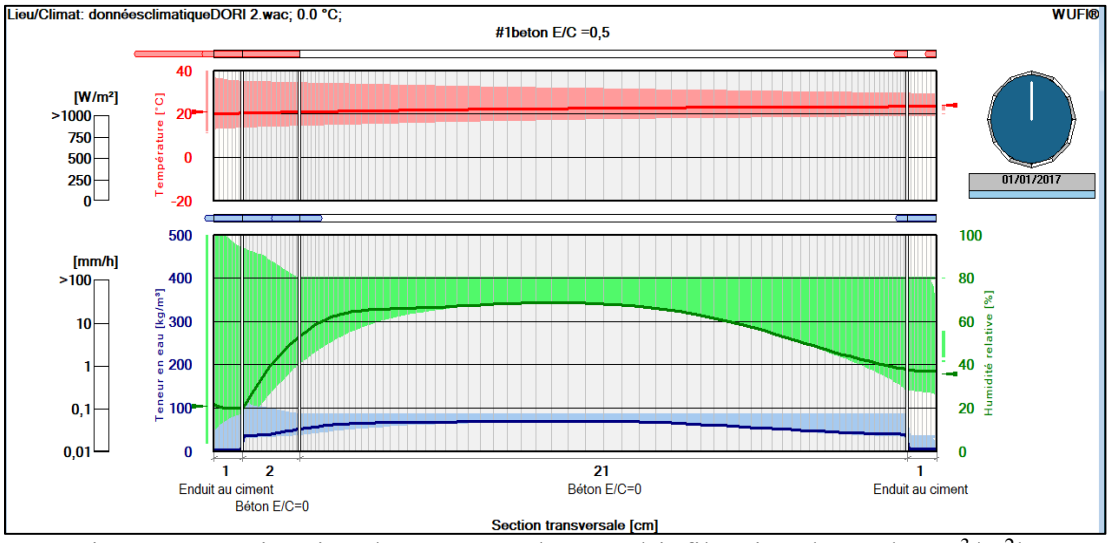


Figure 6.4 Animation du cas 1pour le taux d'infiltration d'eau de 1m^3/m^{2}h, la ville de Dori

Les Figures 6.2 et 6.4 présentent chacune deux graphiques, le premier graphique en rouge illustre le profil de température (°C), l'immense étendue rouge plate représente l'intervalle des valeurs prises en compte durant la période de simulation. Sur le deuxième graphique, la courbe verte correspond à l'humidité relative (%) et la courbe bleue à la teneur en eau (kg/m^3) dans le mur. Les étendues plates, vertes et bleues sont les intervalles de valeurs

prises en compte durant la simulation pour l'humidité relative et la teneur en eau. Ces graphiques correspondent aux résultats de la période du 01/01/2017 (fin de simulation). En fin de simulation, on peut visualiser les courbes permettant d'évaluer l'évolution de la teneur en eau totale, de l'humidité relative, de la température de la surface intérieure et extérieure des murs et pour chaque composant des murs au cours du temps.

6.1.1 Résultats de la simulation des murs de la ville de Montréal

Les courbes de teneur en eau totale des murs et la teneur en eau pour chaque matériau sont disponibles. Le plus intéressant ici est de se concentrer sur ce qui se passe à l'intérieur des bétons de chanvre, de l'isolant en laine de verre et à l'extérieur de l'isolant en polystyrène expansé (PSE). Des moniteurs sont placés à chaque endroit de l'isolant afin de relever l'humidité relative captée par l'isolant au cours du temps et la quantité de chaleur qui arrive à pénétrer dans les murs. Les courbes obtenues nous permettent d'évaluer la performance de l'isolant en matière de gestion de l'humidité et de chaleur pénétrant dans le mur de l'extérieur vers l'intérieur de chaque isolant.

6.1.1.1 Teneur en eau totale, teneur en eau et l'humidité relative des matériaux des murs pour chaque scénario

Dans ce paragraphe, les courbes des teneurs en eau et d'humidité des matériaux de chaque mur pour des infiltrations de 1 m^3/m^2 h et de 5 m^3/m^2 h et pour des taux de pluie battante de 1% et 5% sont présentées. Les Figures 6.5 et 6.6 nous présentent les courbes de la teneur en eau totale des murs en isolant en laine de verre, béton de chanvre HLC2 et béton de chanvre Mix3.

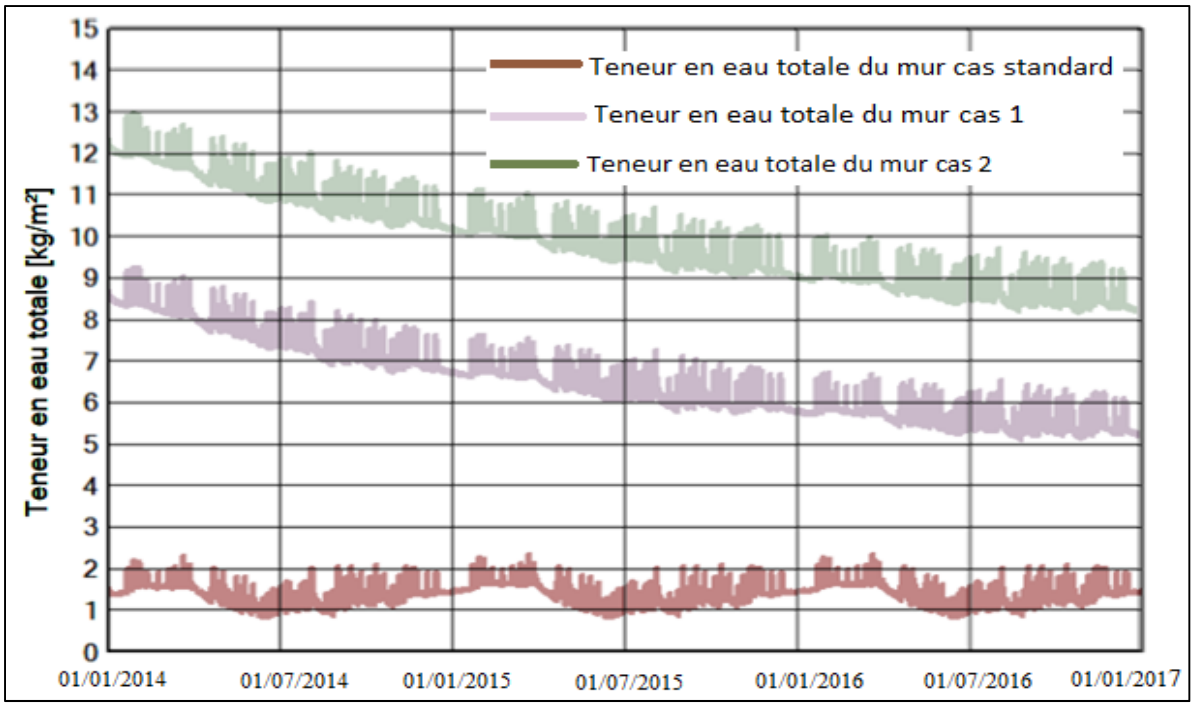


Figure 6.5 Teneur en eau totale des murs cas standard, mur 1 et mur 2 à Montréal pour un taux d'infiltration d'eau de 1 m^3/m^2 h

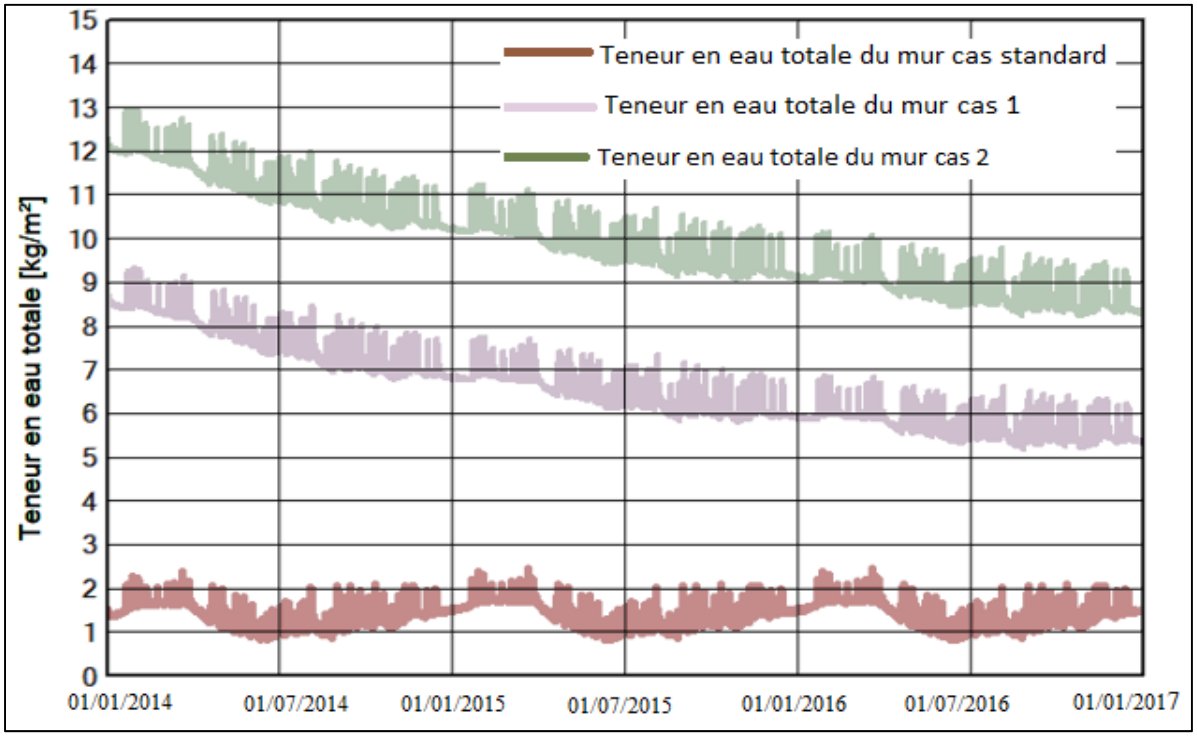


Figure 6.6 Teneur en eau totale des murs cas standard, mur 1 et mur 2 pour un taux d'infiltration d'eau de 5 m^3/m^2 h

Il y a une diminution progressive de l'eau contenue dans les enveloppes pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h et 5 m^3/m^2 h. De ce fait, les matériaux constituants l'enveloppe de ces murs ont tendance à s'assécher. Il n'y a donc pas d'accumulation d'eau dans l'enveloppe. Pour le cas standard, la courbe de teneur en eau totale montre des fluctuations saisonnières. L'enveloppe sèche en saison sèche et se mouille en saison humidité. Les taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h et 5 m^3/m^2 h n'influence pas la teneur en eau totale des murs. Pour la simulation avec une fraction de pluie battante de 1 % et de 5 % sur la surface extérieure des murs, les résultats sont présentés aux Figures 6.7, 6.8 et 6.9.

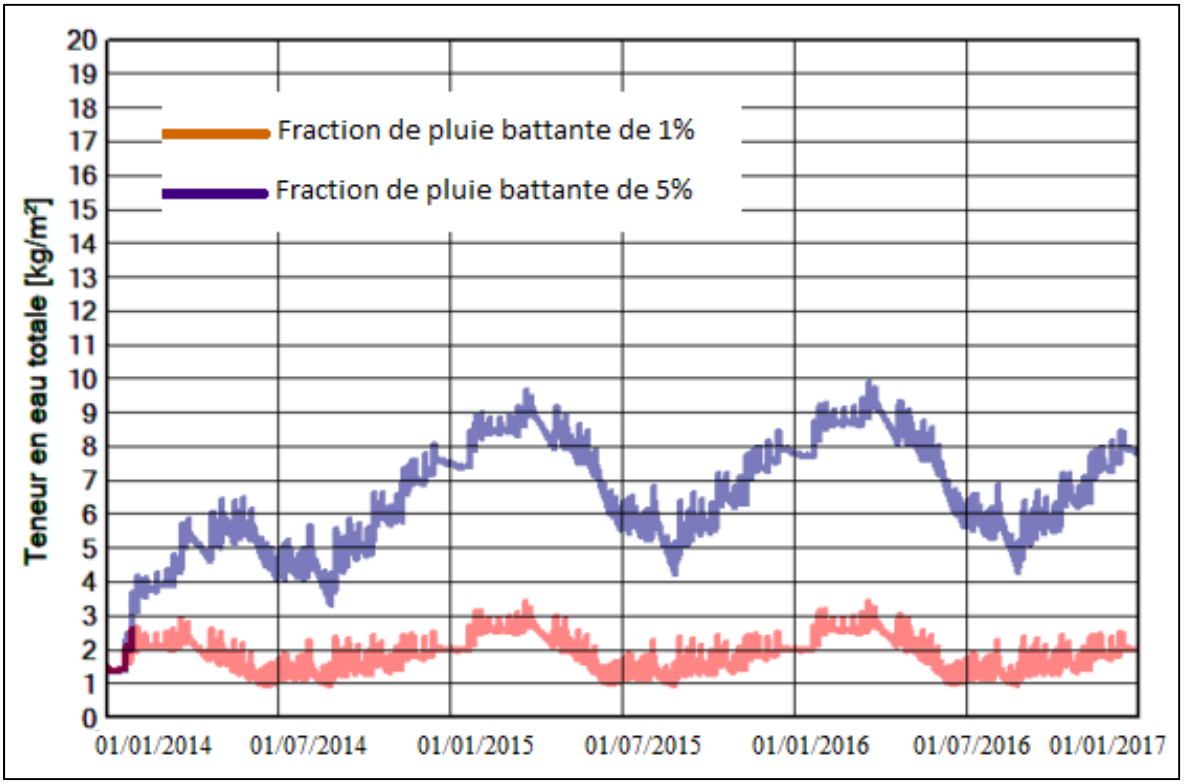


Figure 6.7 Courbes teneur en eau totale du mur en laine de verre

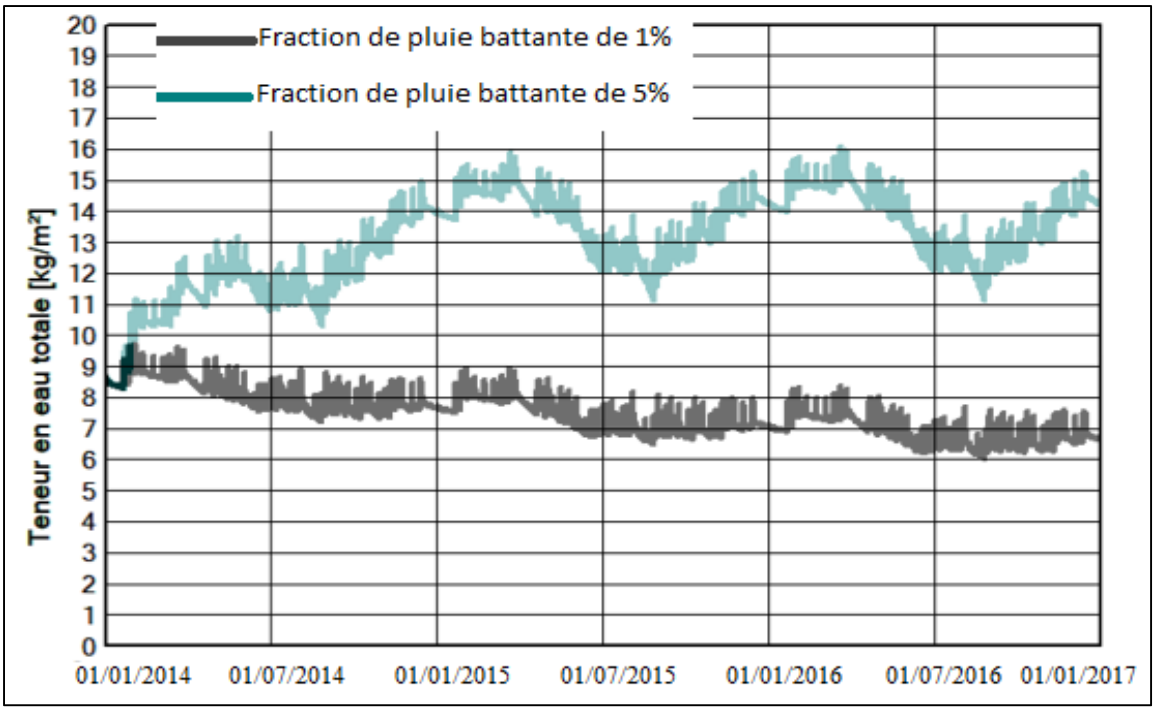


Figure 6.8 Courbes de teneur en eau totale du mur en béton de chanvre HLC2

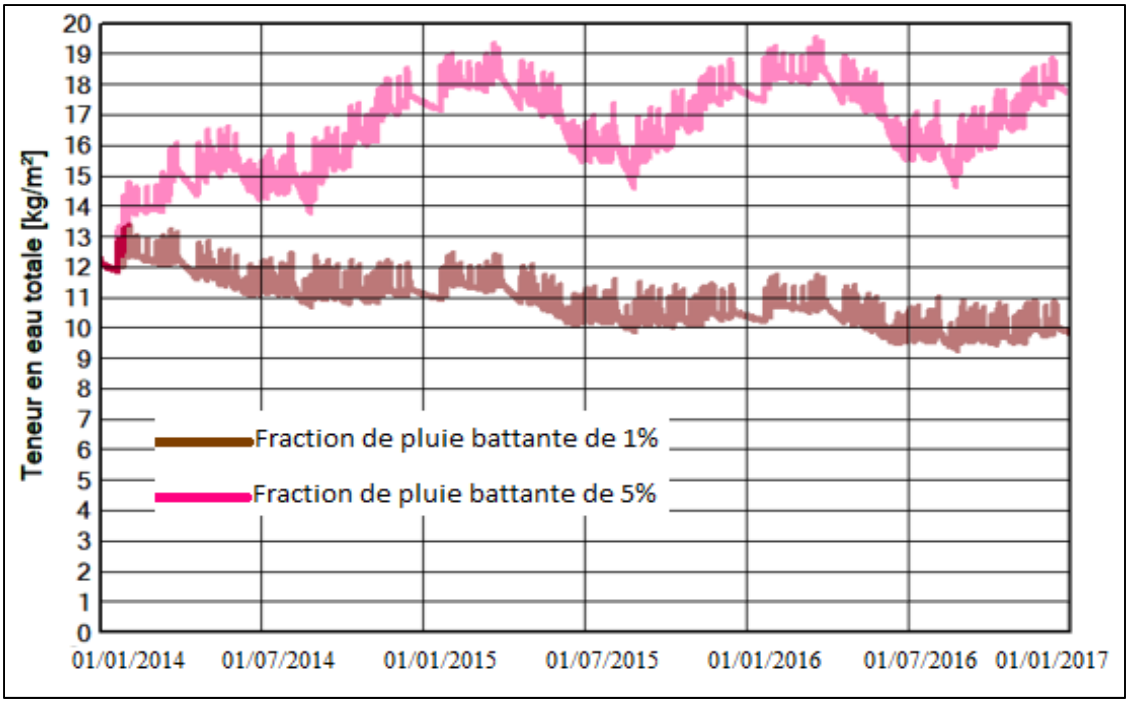


Figure 6.9 Teneur en eau totale des murs en béton de chanvre Mix 3

Lors que nous observons les Figures 6.7, 6.8 et 6.9, on constate que les murs peuvent résister à une fraction de pluie battante de 1 % et non de 5 %. Pour une fraction de pluie battante de 5 %, le risque de condensation dans les murs est très élevé. Les courbes de la teneur en eau de la laine de verre, des bétons de chanvre et de l'isolant en polystyrène expansé sont présentés aux Figures 6.10, 6.11 et 6.12 pour le taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h et 5 m^3/m^2 h afin de mieux voir l'évolution de la teneur en eau dans ces matériaux.

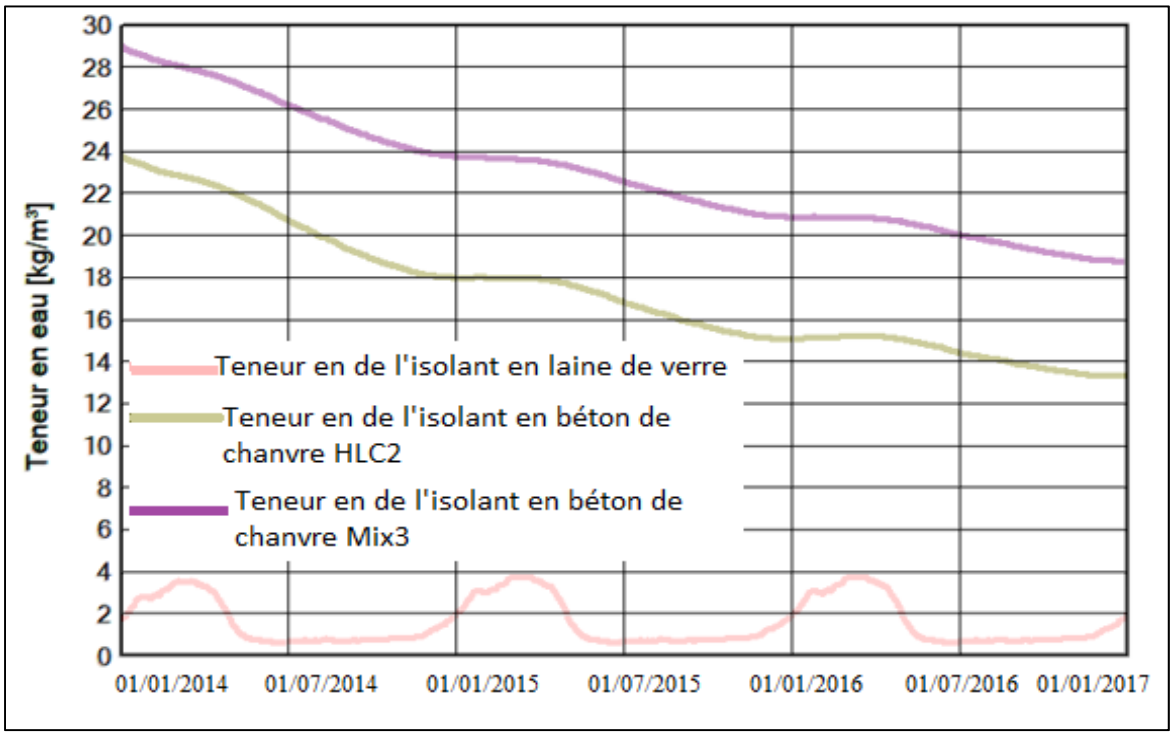


Figure 6.10 Teneur en eau de l'isolant en laine de verre, du béton de chanvre HLC2 et du béton de chanvre Mix3 pour le taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h

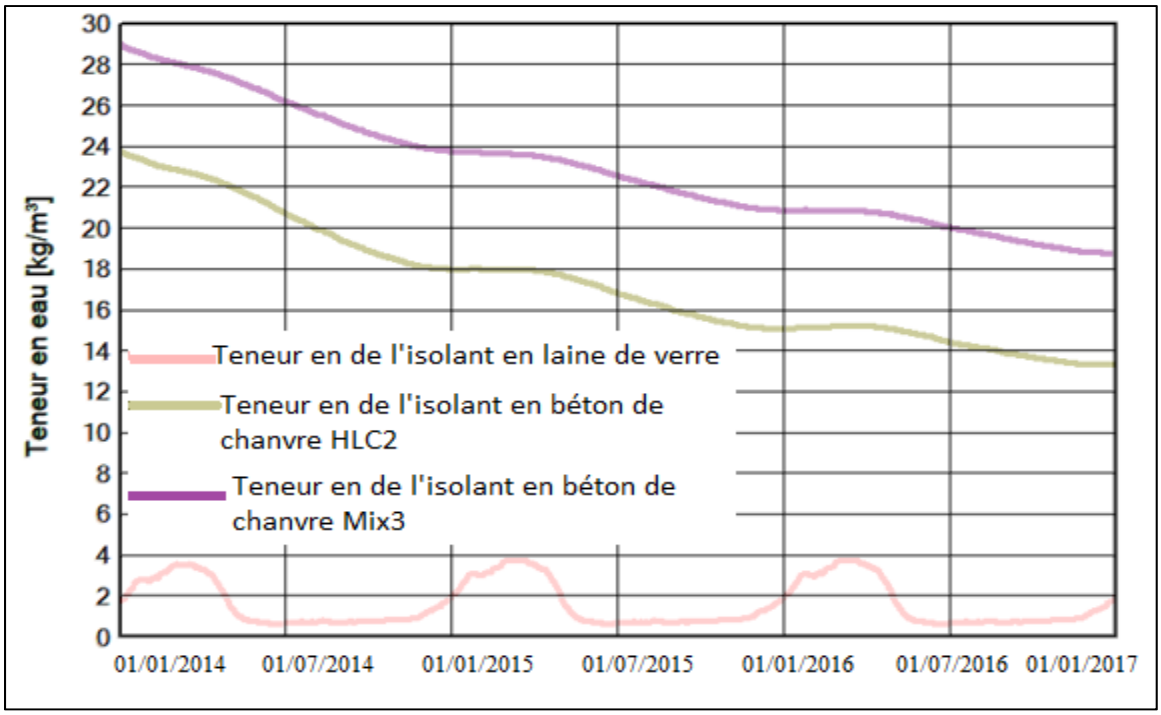


Figure 6.11 Teneur en eau de l'isolant en laine de verre, du béton de chanvre HLC2 et du béton de chanvre Mix3 pour le taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h

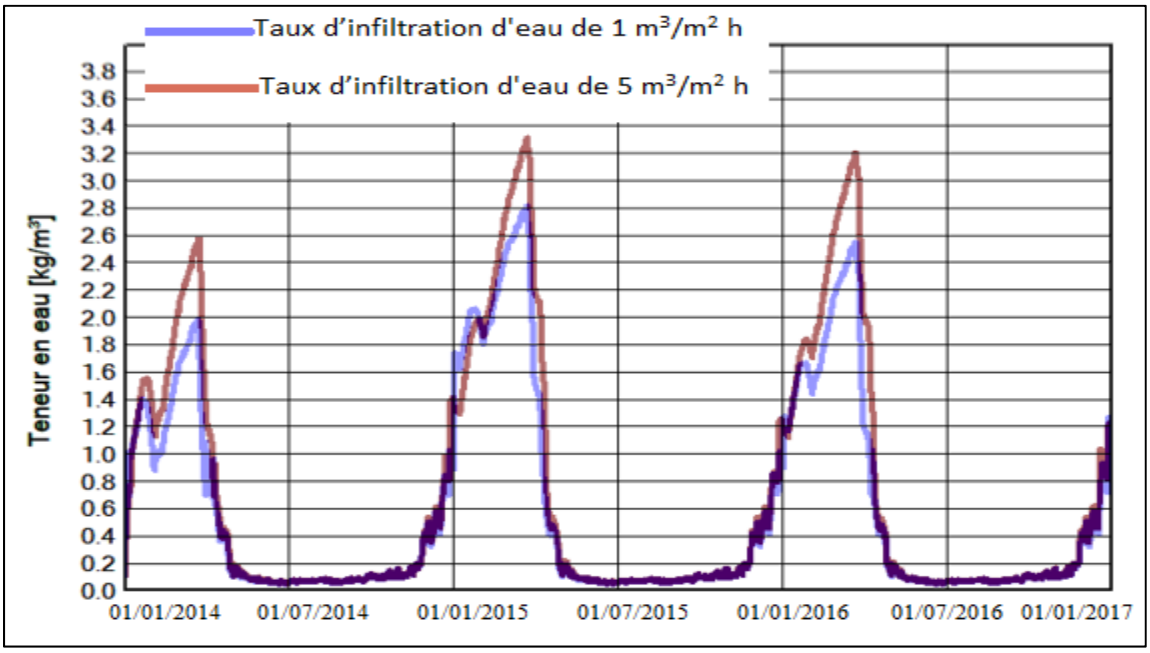


Figure 6.12 Teneur en eau de l'isolant en polystyrène expansé

Les Figures 6.10 et 6.11 montrent qu'il y a une diminution progressive de l'eau contenue dans les isolants en laine de verre, béton de chanvre HLC2 et Mix3 pour un taux d'infiltration d'eau de 1 m^3/m^2 h et 5 m^3/m^2 h. Les bétons de chanvre ont tendance à s'assécher le long de la simulation, sauf la laine de verre qui présente des fluctuations saisonnières. A 5 m^3/m^2 h d'infiltration d'eau, la teneur en eau du polystyrène expansé augmente. Toutefois, il n'y pas de risque de condensation, car il chute après (Figure 6.12). Pour bien voir l'évolution de l'humidité dans les murs, les courbes d'humidité relative de chaque mur pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h et 5 m^3/m^2 h sont présentées aux Figures 6.13 à 6.18.

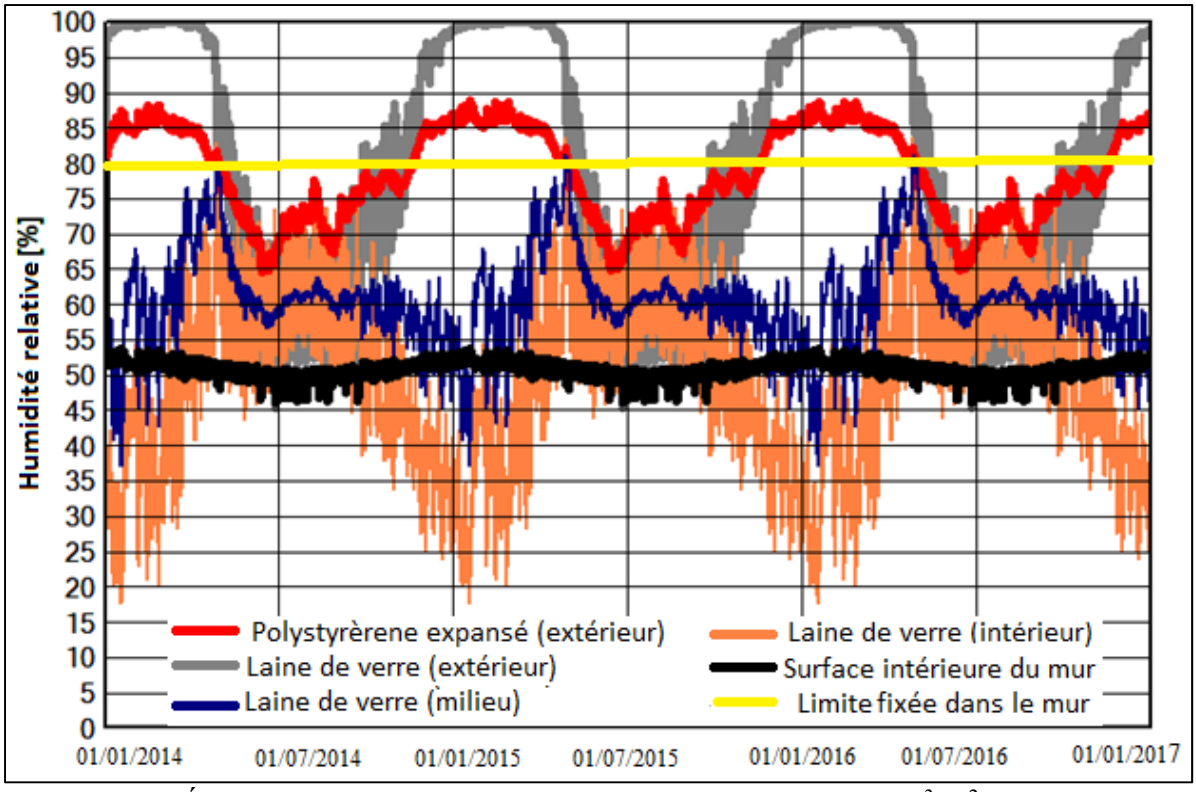


Figure 6.13 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: cas standard

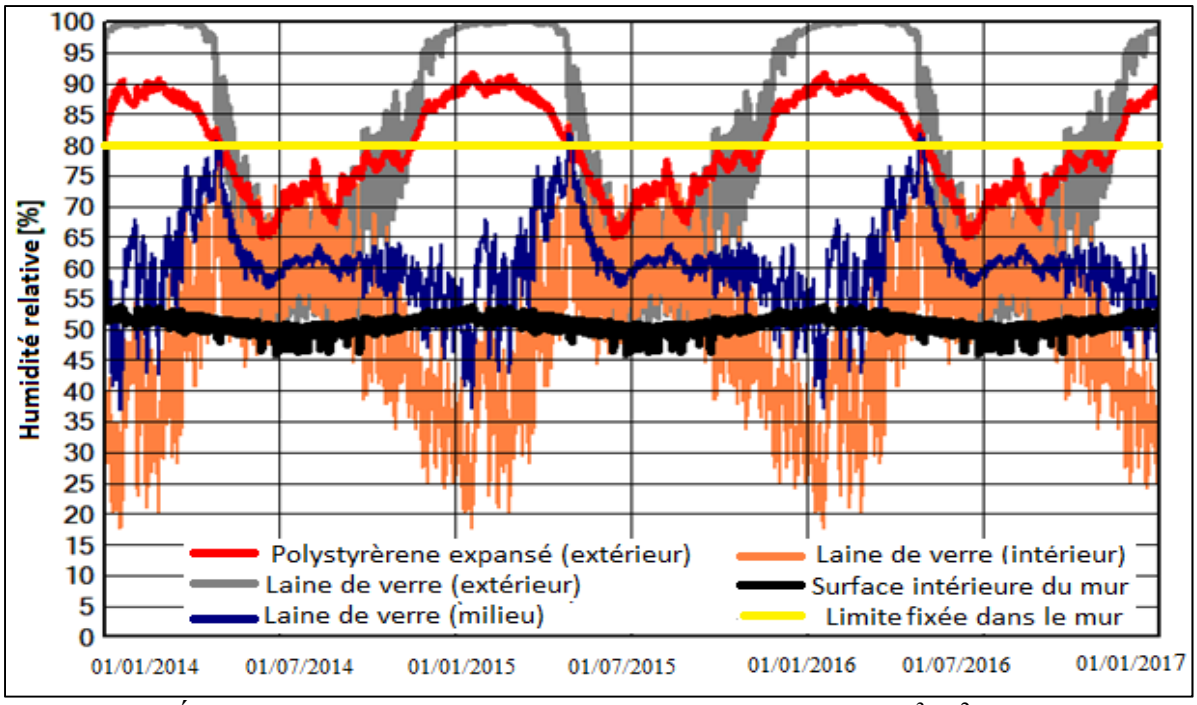


Figure 6.14 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: : cas standard

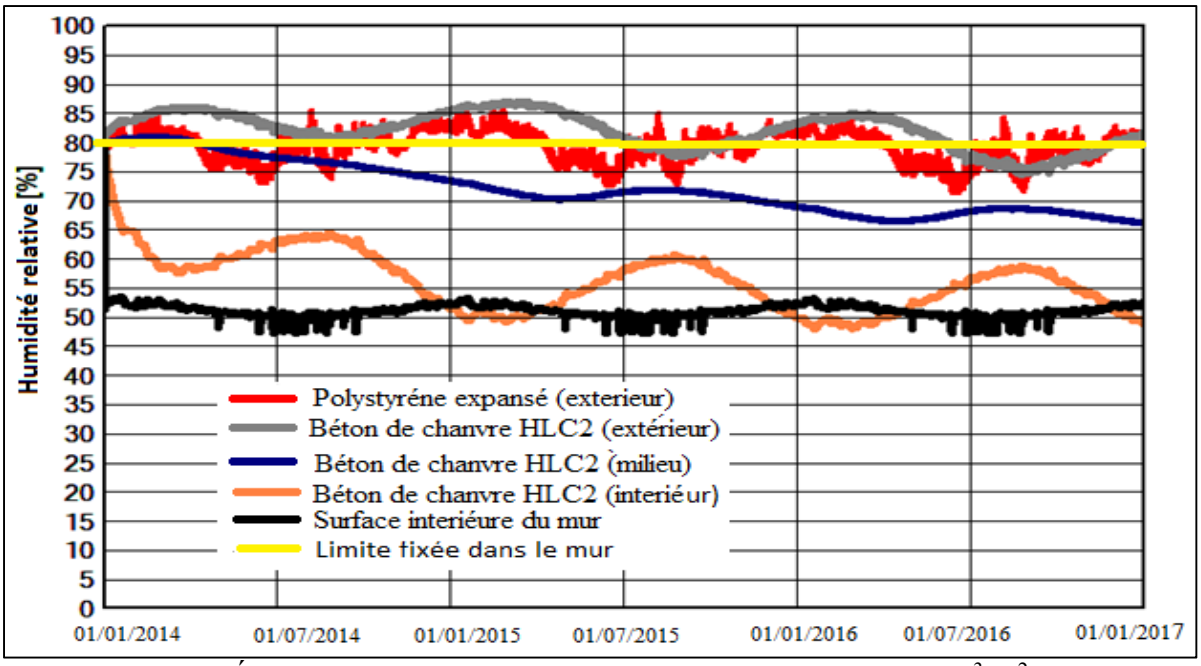


Figure 6.15 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: cas 1

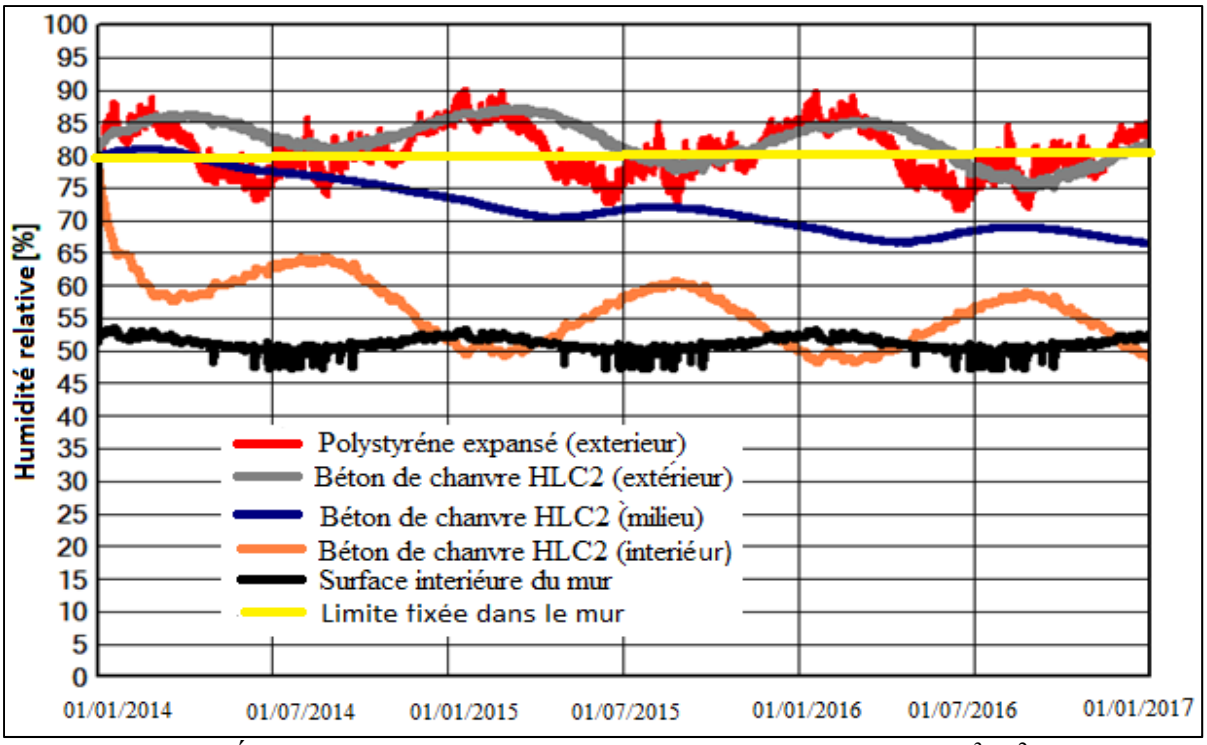


Figure 6.16 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: cas 1

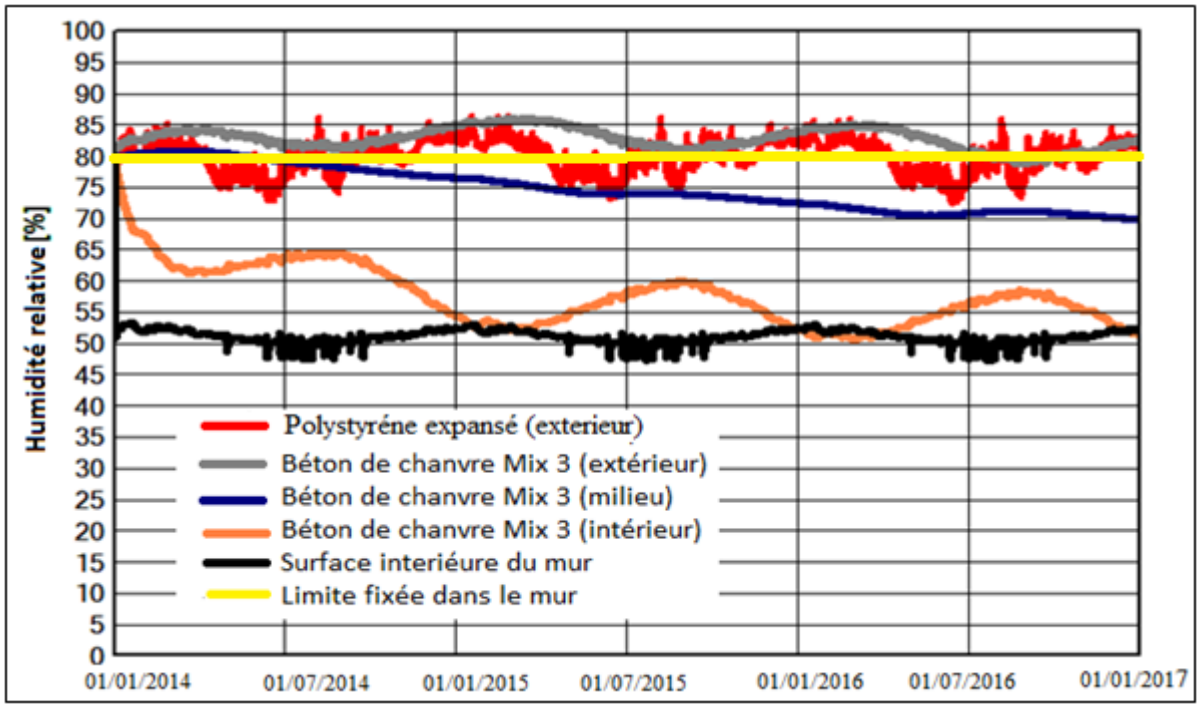


Figure 6.17 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: cas 2

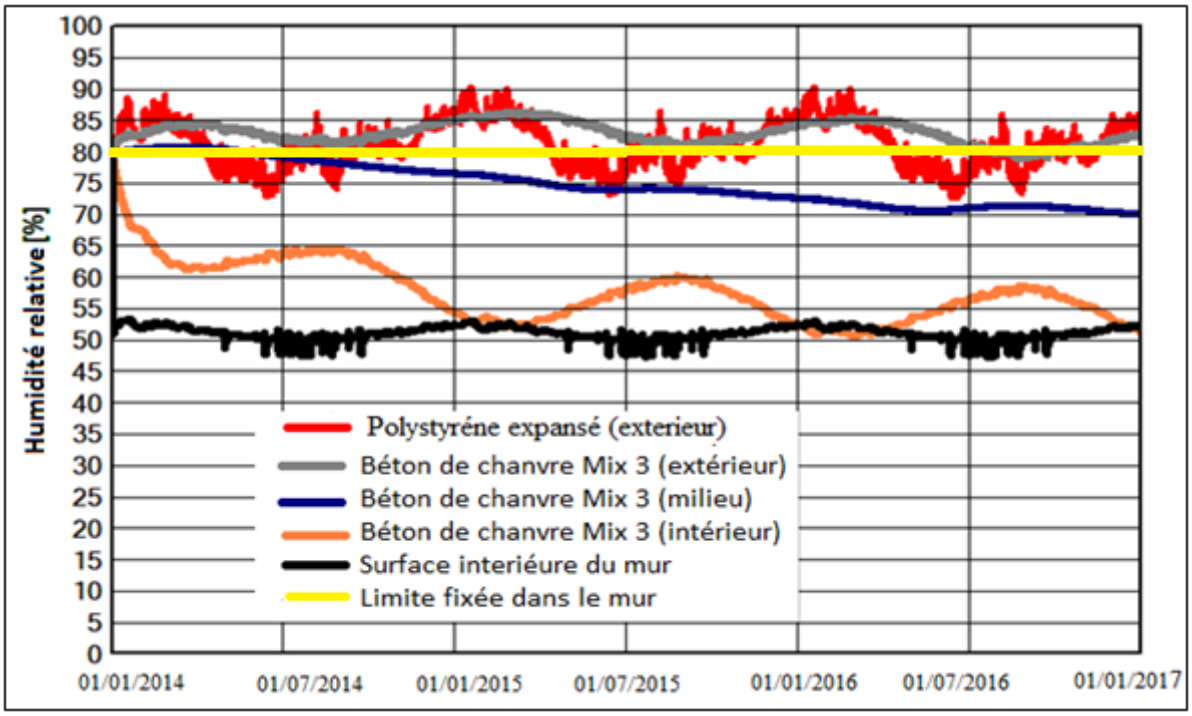


Figure 6.18 Évolution de l'humidité pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: cas 2

L'humidité relative de l'isolant en polystyrène expansé (PSE) augmente avec l'augmentation du taux d'infiltration d'eau. Pour un taux d'infiltration d'eau de 5 m^3/m^2h, l'humidité relative du milieu de la laine de verre dépasse 80 % pour une petite période, ce qui ne cause pas de risque de condensation. La courbe jaune représente l'humidité relative fixée dans le mur pour la condition initiale. Pour une humidité relative d'une partie du mur dépassant les 80 % pour une longue durée, le risque de condensation est élevé. La condition initiale fixée pour l'intérieur du mur est de 50 % d'humidité relative.

Pour les murs en béton de chanvre, l'humidité relative de l'extérieur des bétons dépasse 80 % ainsi que celle de l'extérieur du polystyrène expansé, donc un risque de condensation superficielle est possible. Toutefois, le milieu et l'intérieur des bétons de chanvre ont une humidité relative qui tourne autour de 46 % à 60 % (milieu) et 45 % à 55 % (intérieur). De ce fait, pour concevoir des murs en béton de chanvre sans risque de condensation à leurs extrémités extérieures, il est important de concevoir des bâtiments plus étanches qui empêchent la pénétration d'eau de plus de 1 m^3/m^2 h.

6.1.1.2 Évolution de la température à l'extérieur du polystyrène et dans l'isolant et de la surface intérieure du mur

Ce paragraphe présente la variation de la température dans les murs simulés. Les Figures 6.19 à 6.24 présentent les courbes de la température obtenues en fin de simulation. Ces courbes nous montrent la capacité de chaque mur à réguler la température interne.

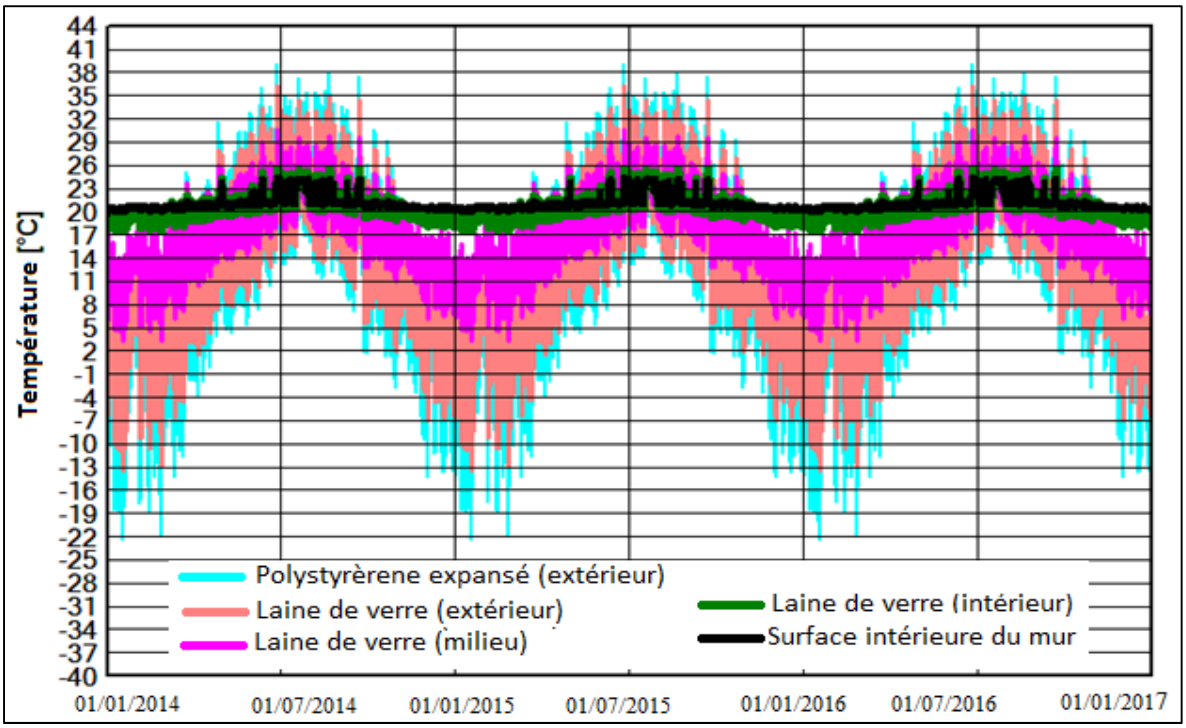


Figure 6.19 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: Cas standard

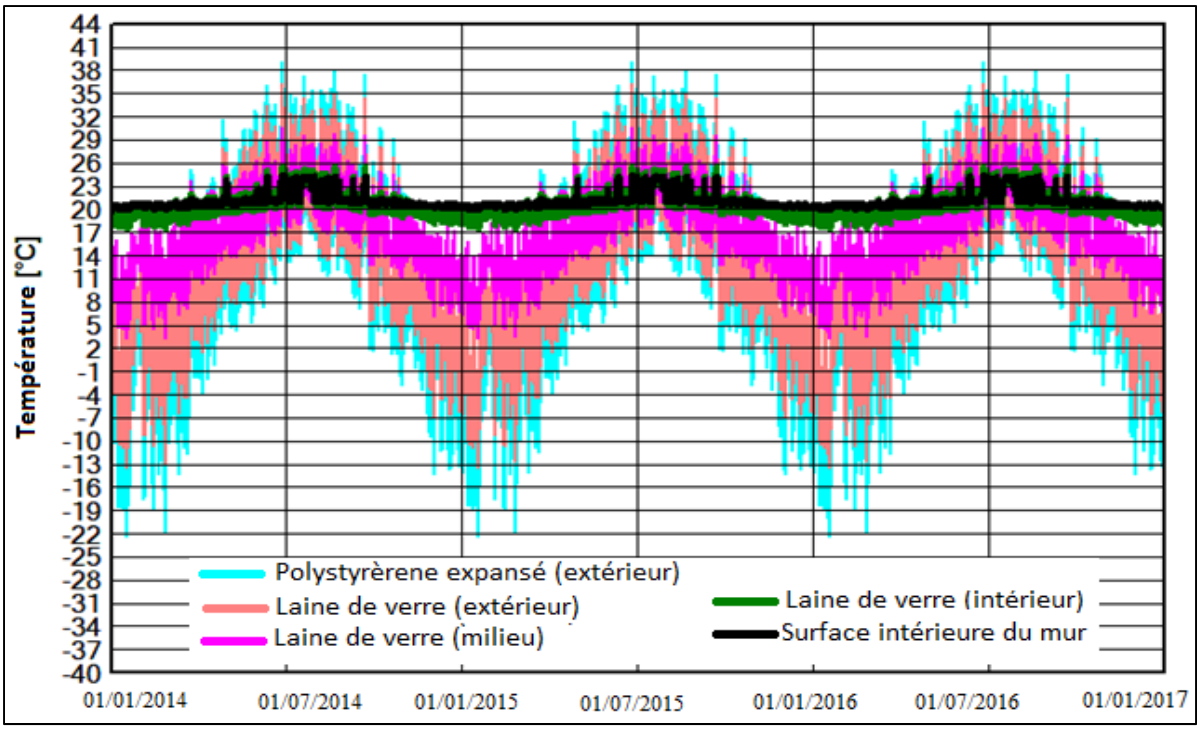


Figure 6.20 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: Cas standard

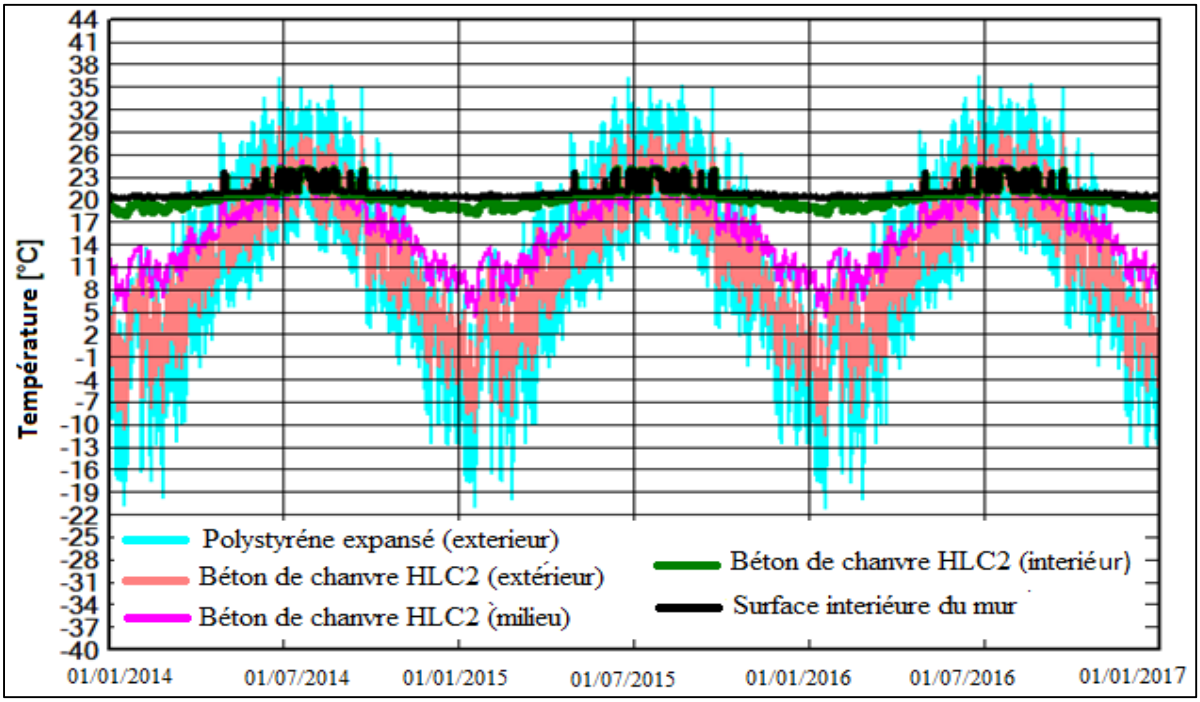


Figure 6.21 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: Cas 1

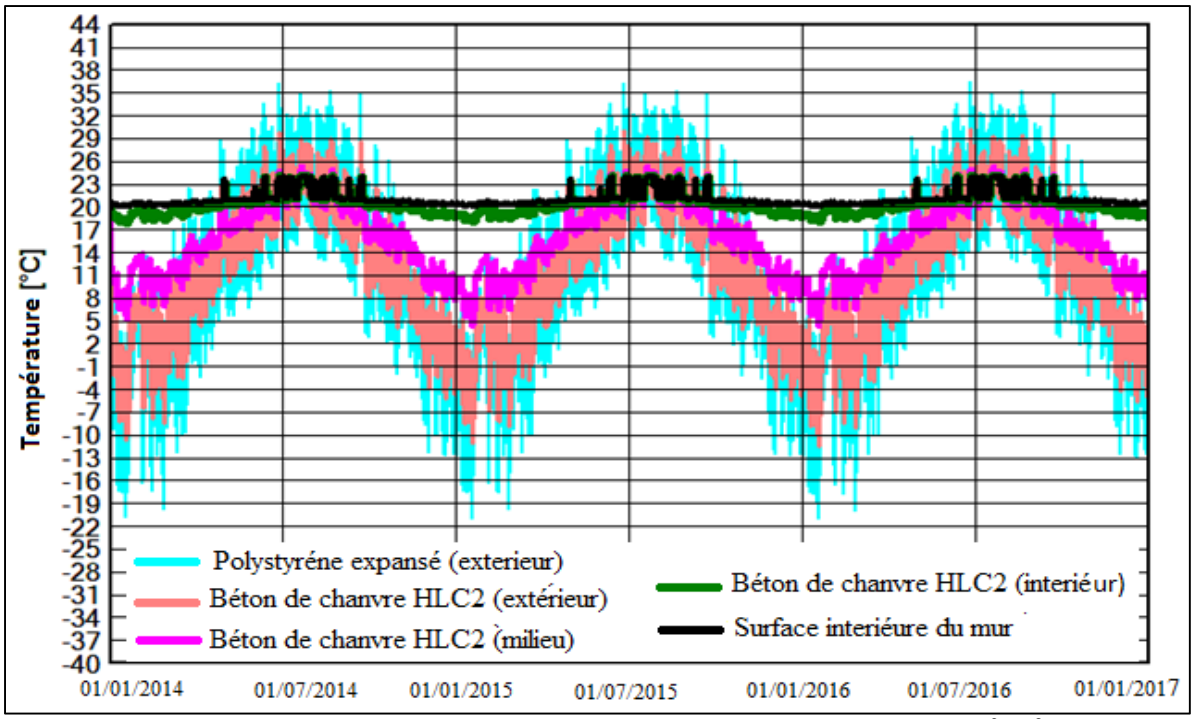


Figure 6.22 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: Cas 1

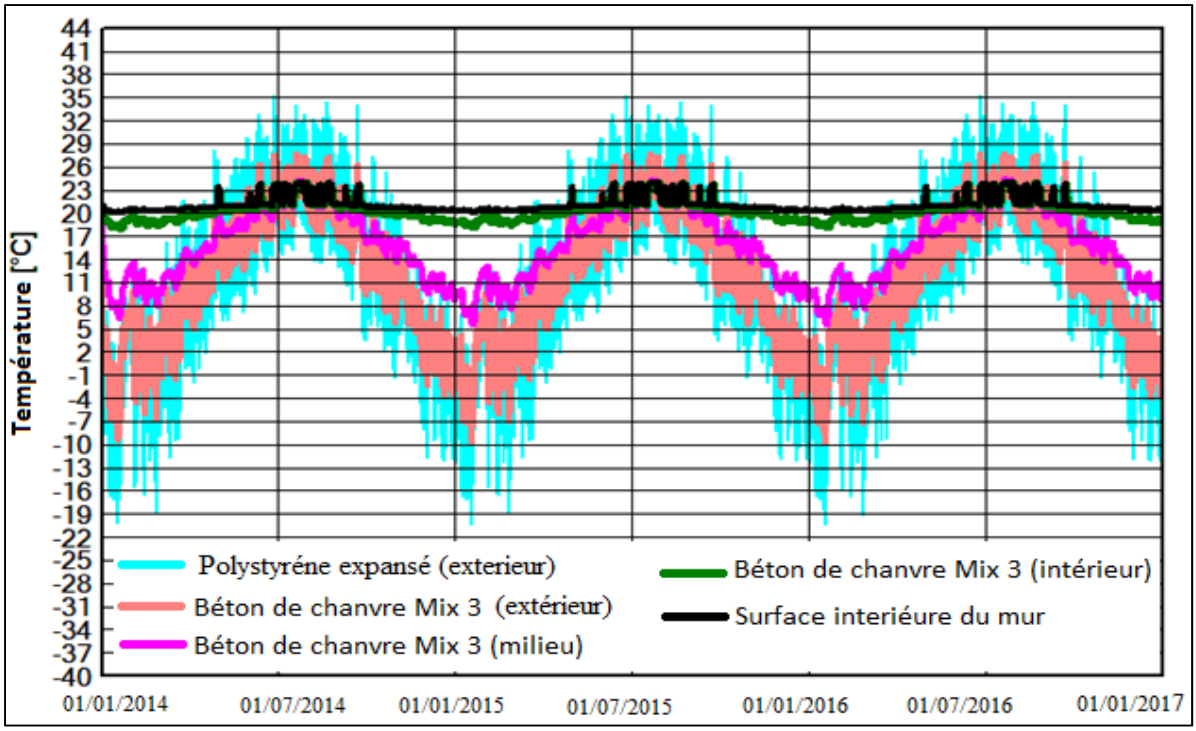


Figure 6.23 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 1 m^3/m^2 h: Cas 2

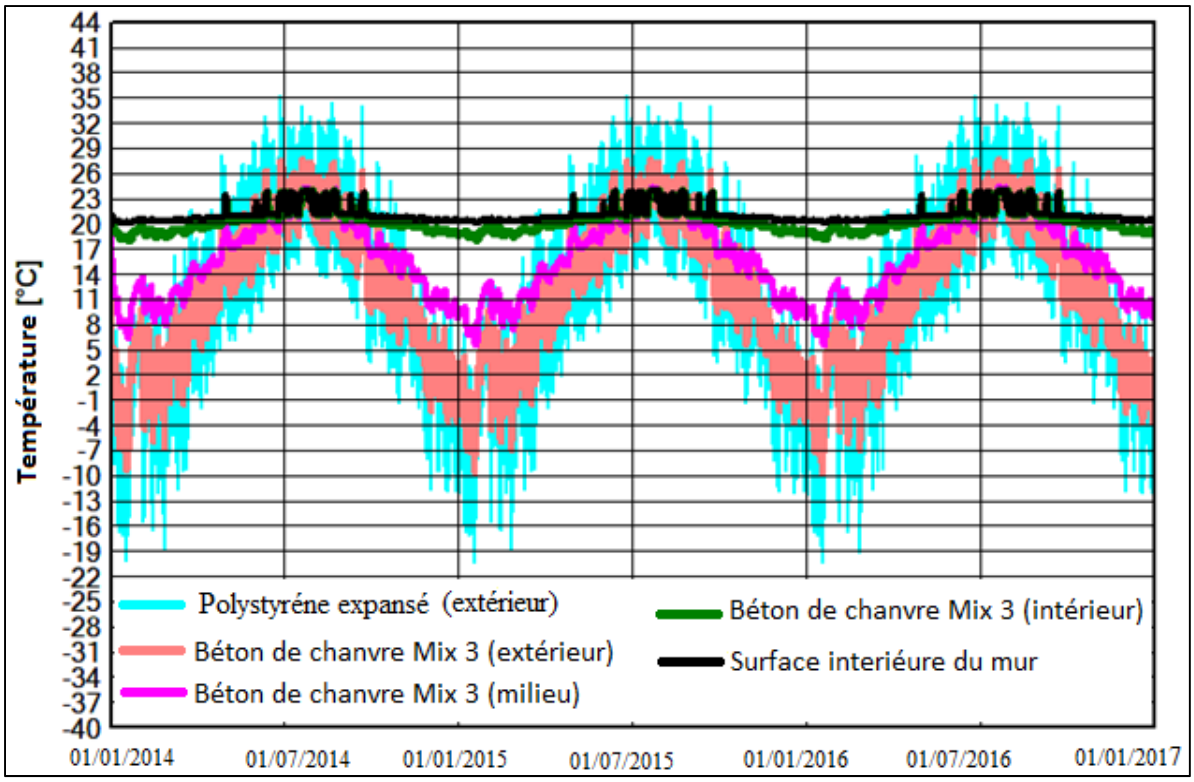


Figure 6.24 Variation de la température pour un taux d'infiltration de 5 m^3/m^2 h: Cas 2

Lorsqu'on observe les Figures 6.19 à 6.24, on constate que les surfaces intérieures des isolants en béton de chanvre présentent des températures inférieures à la température de la surface intérieure de l'isolant en laine de verre en été avec une différence de 2°C. Pour la surface intérieure des deux murs en béton de chanvre, une différence de température de 0,5 °C est observée.

6.1.2 Résultats de la simulation des murs de la ville de Dori

La ville de Dori étant une ville présentant des températures extrêmement chaudes, le plus important ici est de se concentrer sur la propagation de la chaleur à l'extérieur et intérieur des différents bétons et briques intégrés dans le mur. Les courbes de l'évolution de la température dans les murs, de la température de la surface extérieure du mur et la température intérieure du mur ont été obtenues en plaçant des moniteurs à chaque position du mur voulue. Ces courbes nous permettent d'évaluer la performance des murs en matière de

gestion de la chaleur qui pénètre dans le mur. Les Figures 6.25 à 6.30 illustrent la variation de la température dans le bloc de ciment, la brique de terre comprimée et le béton de chanvre pour des fractions de rayonnement solaire incidentes de 1 % et de 5 %.

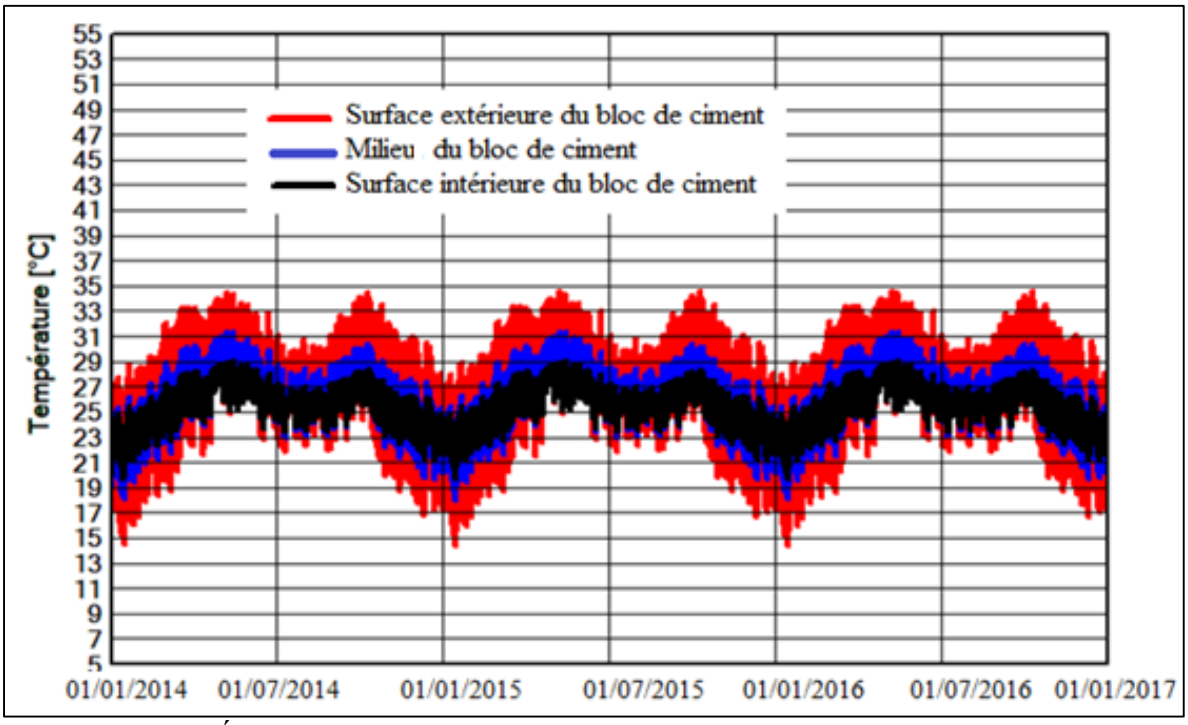


Figure 6.25 Évolution de la température dans le bloc de ciment pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 %

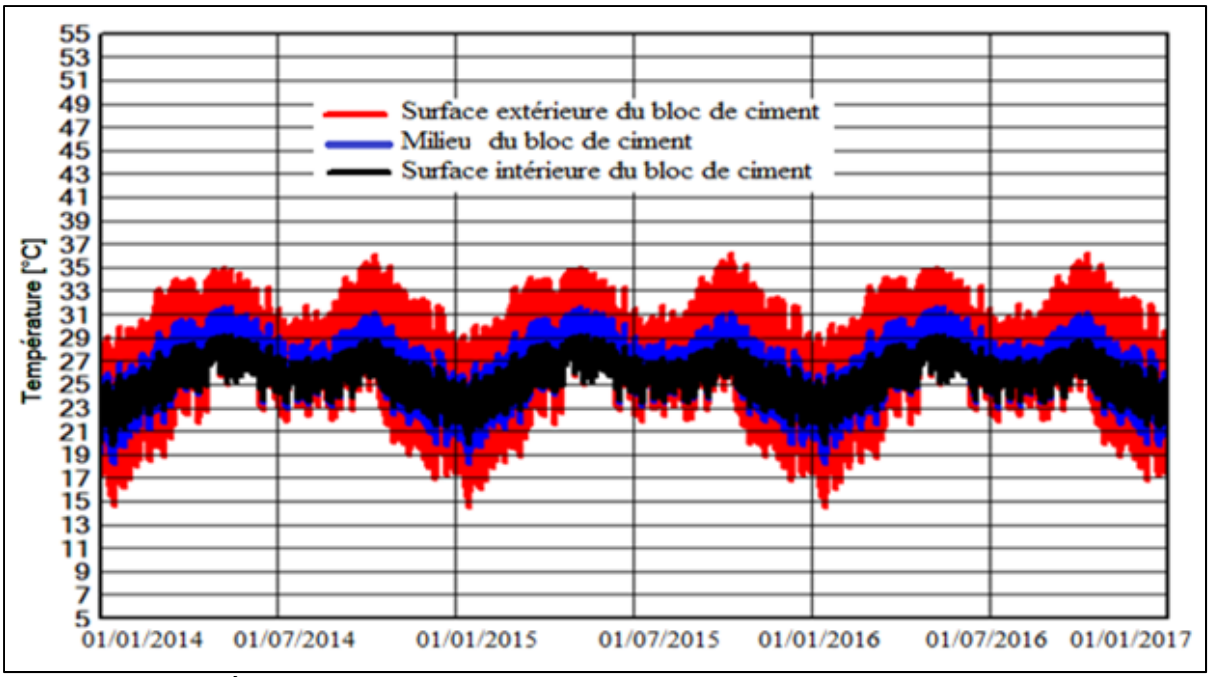


Figure 6.26 Évolution de la température dans le bloc de ciment pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 %

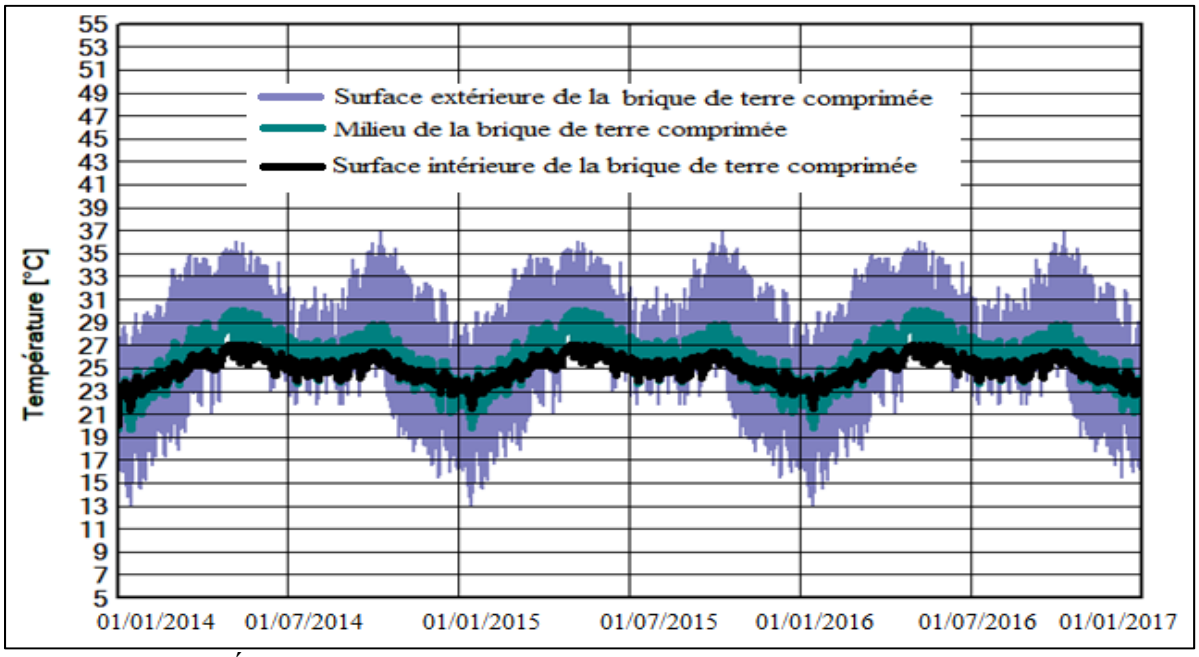


Figure 6.27 Évolution de la température dans un mur en brique de terre comprimée pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 %

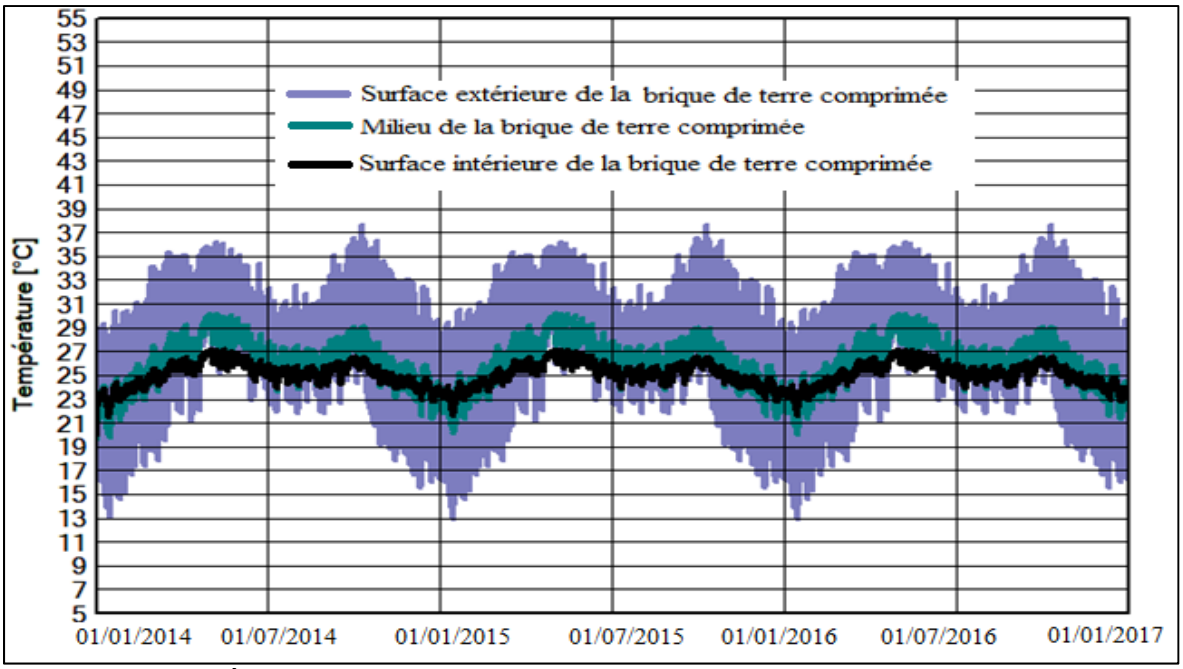


Figure 6.28 Évolution de la température dans un mur en brique de terre comprimée pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 %

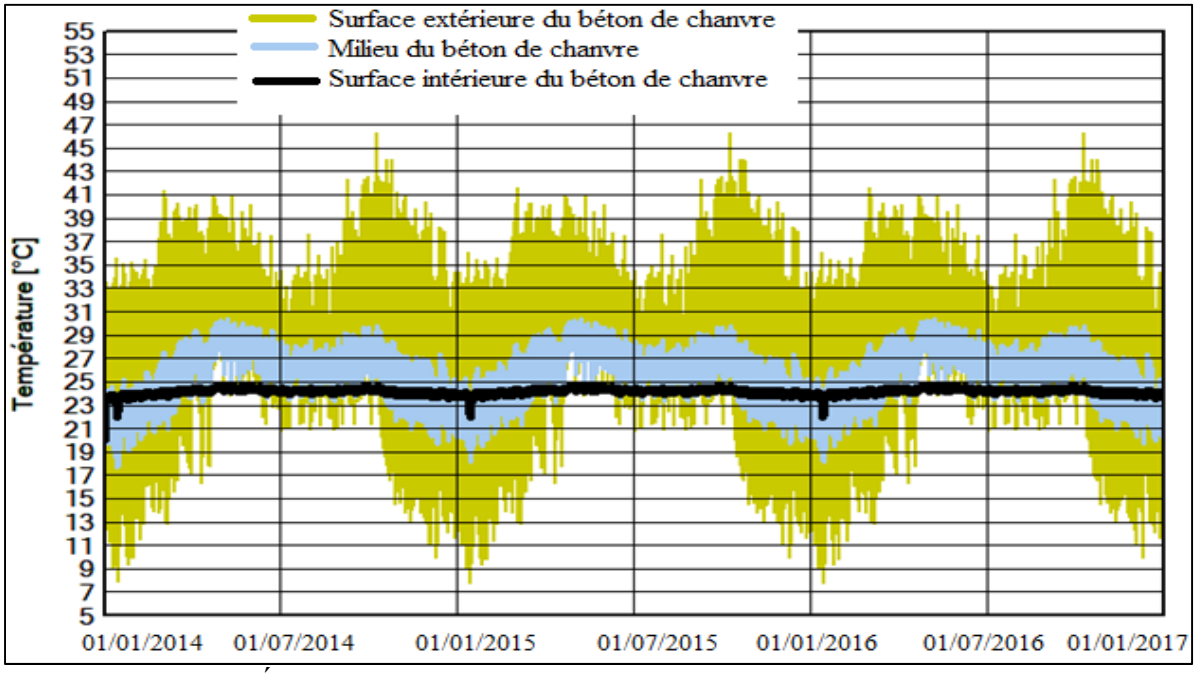


Figure 6.29 Évolution de la température dans un mur en béton de chanvre pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 %

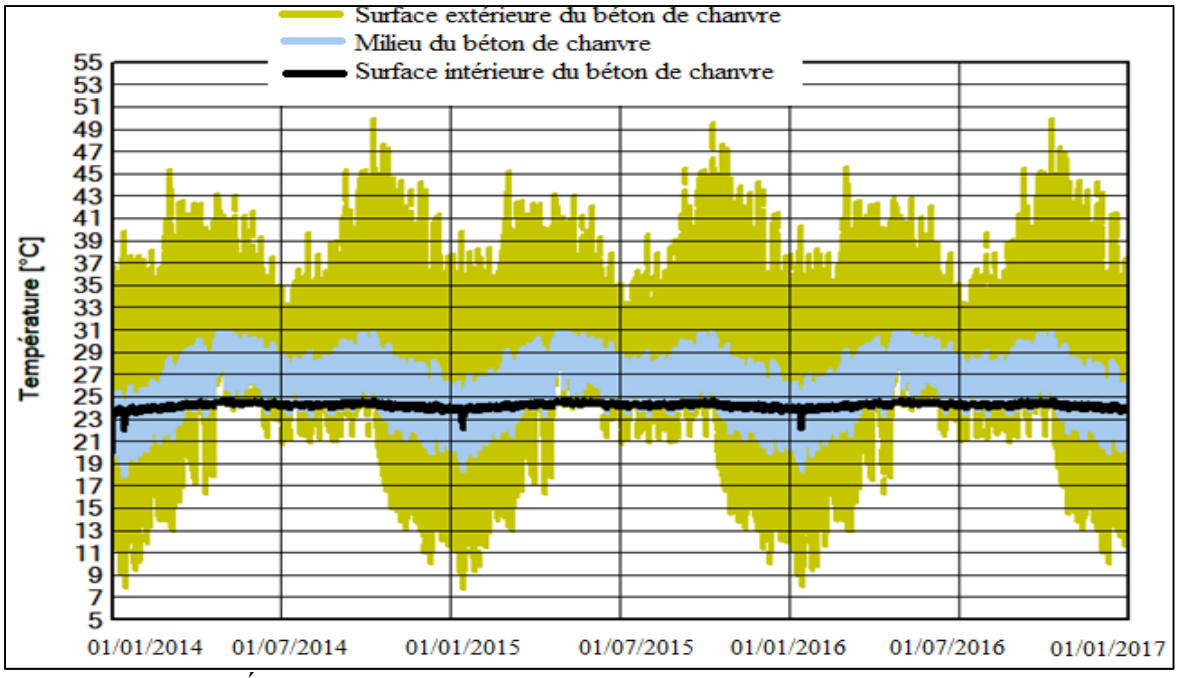


Figure 6.30 Évolution de la température dans un mur en béton de chanvre pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 %

Le béton de chanvre et la brique de terre comprimée sont des matériaux qui régulent facilement la température par rapport au bloc de ciment (Figures 6.27 à 6.30). La température de la surface intérieure du béton de chanvre est plus basse que celle de la brique de terre comprimée et du bloc de ciment pour des températures extérieures élevées.

6.2 Discussions

6.2.1 Discussion des résultats des murs simulés par les données de la ville de Montréal

Une fois les résultats extraits pour les différents cas étudiés, une analyse du comportement hygrothermique des murs peut alors être possible. Concernant les profils des températures de la surface intérieure des murs des deux bétons de chanvre simulés, on constate qu'il n'a pas de grand changement (Tableau 6.1 : cas 1 et cas 2). Les bétons de chanvre régulent plus

efficacement la température que la laine de verre (Tableau 6.1 : cas standard 1, température de la surface de l'isolant).

Tableau 6.1 Récapitulation des résultats de la variation de température des murs

Taux d'infiltration		**Variation de la température°C**				
		Extérieur du PSE	Extérieur de l'isolant	Milieu de l'isolant	Intérieur de l'isolant	Intérieur du mur
Cas Standard	1 m^3/m^2 h	(-) 22 à 39	(-) 14 à 36	4 à 30	17,5 à 26	20 à 24,5
	5 m^3/m^2 h	(-) 22 à 39	(-) 14 à 36	4 à 30	17,5 à 26	20 à 24,5
Cas 1	1 m^3/m^2 h	(-) 21 à 36	(-) 11 à 30	4 à 26	18 à 24,2	20 à 24
	5 m^3/m^2 h	(-) 21 à 36	(-) 11 à 30	4 à 26	18 à 24,2	20 à 24
Cas 2	1 m^3/m^2 h	(-) 20 à 36	(-) 10 à 28	6 à 24,2	18 à 24	20 à 24
	5 m^3/m^2 h	(-) 20 à 36	(-) 10 à 28	6 à 24,2	18 à 24	20 à 24

Du point de vue de l'humidité relative, pour des infiltrations d'eau de plus de 1 m^3/m^2 h, les deux bétons de chanvre peuvent présenter des risques de condensation. Pour le séchage, l'isolant en laine de verre sèche plus efficacement et rapidement par rapport aux bétons de chanvre donc il présente moins de risque de condensation à l'extrémité de sa surface extérieure (Tableau 6.2 : cas standard 1).

Tableau 6.2 Récapitulation des résultats de l'humidité relative des murs pour les deux taux d'infiltration d'eau

Taux d'infiltration		**Humidité relative %**				
		Extérieur du PSE	Extérieur de l'isolant	Milieu de l'isolant	Intérieur de l'isolant	Intérieur du mur
Cas standard	1 m^3/m^2 h	65 à 89	45 à 100	37 à 81	18 à 83	46 à 54
	5 m^3/m^2 h	61 à 91	45 à 100	37 à 81	18 à 84	46 à 54
Cas 1	1 m^3/m^2 h	71 à 85	75 à 85	66 à 69	49 à 60	47 à 53
	5 m^3/m^2 h	71 à 90	76 à 87	66 à 73	49 à 60	47 à 53
Cas 2	1 m^3/m^2 h	75 à 86	78 à 85	74 à 70	50 à 60	48 à 54
	5 m^3/m^2 h	71 à 90	79 à 86	74 à 77	50 à 60	48 à 54

Tableau 6.3 Récapitulation des résultats de l'humidité relative des murs pour les deux fractions de pluie battante

Fraction de pluie battante		Humidité relative %				
		Extérieur du PSE	Extérieur de l'isolant	Milieu de l'isolant	Intérieur de l'isolant	Intérieur du mur
Cas standard	1 %	69 à 98	47 à 100	37 à 83	17 à 85	47 à 53
	5 %	92 à 100	63 à 100	37 à 87	17 à 87	47 à 53
Cas 1	1 %	75 à 96	80 à 88	70 à 74	49 à 61	47 à 53
	5 %	92 à 100	87 à 90	74 à 78	49 à 63	47 à 53
Cas 2	1 %	76 à 96	82 à 88	72 à 76	51 à 61	47 à 53
	5 %	92 à 100	88 à 90	76 à 78	51 à 61	47 à 53

Le Tableau 6.3 présente la récapitulation des résultats de la simulation des murs et les Figures 6.31 à 6.36 montrent l'évolution de l'humidité relative dans les murs pour une fraction de pluie battante de 1 % et 5 %. Pour avoir des murs très performants sans inquiétude sur les risques d'accumulation d'eau, il est nécessaire de concevoir des murs plus étanches pour limiter l'infiltration d'eau de moins de 1 m^3/m^2 h et une fraction de pluie battante de moins de 1 %. La fraction de pluie battante a une très grande influence sur les murs que le taux d'infiltration d'eau. Cependant, les résultats obtenus après la simulation concordent avec la littérature en termes de régulation de l'humidité intérieure et de la température intérieure. Il en ressort dans la littérature qu'avec une porosité comprise entre 60% à 80 %, le béton de chanvre est un matériau perméable à l'air, lui rendant capable de capter plus d'humidité de l'air extérieur sans être détériorer. L'humidité du béton de chanvre augmente avec l'augmentation de l'humidité de l'air extérieure car il est un lieu de stockage d'humidité. Cette capacité de stocker l'humidité lui donne un grand avantage sur sa capacité à régler l'humidité relative de l'environnement. Les Tableaux 6.4 et 6.3 confirment le fait que le beton de chanvre est un materiau qui respire permettant de réguler l'humidité intéreure. Concernant la température, le Tableau 6.5 et la Figure 1.27 montrent que le beton de chanvre est un excellent régulateur de la temperature.

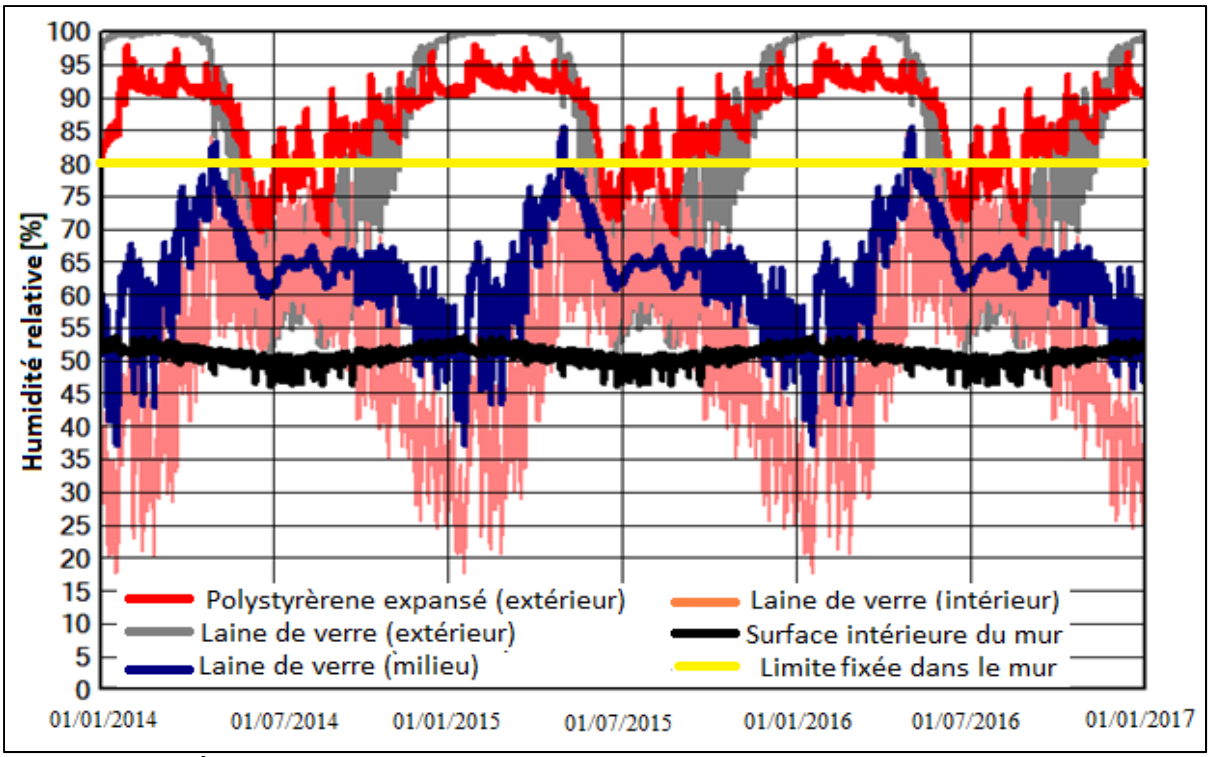


Figure 6.31 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 1 % : Cas standard

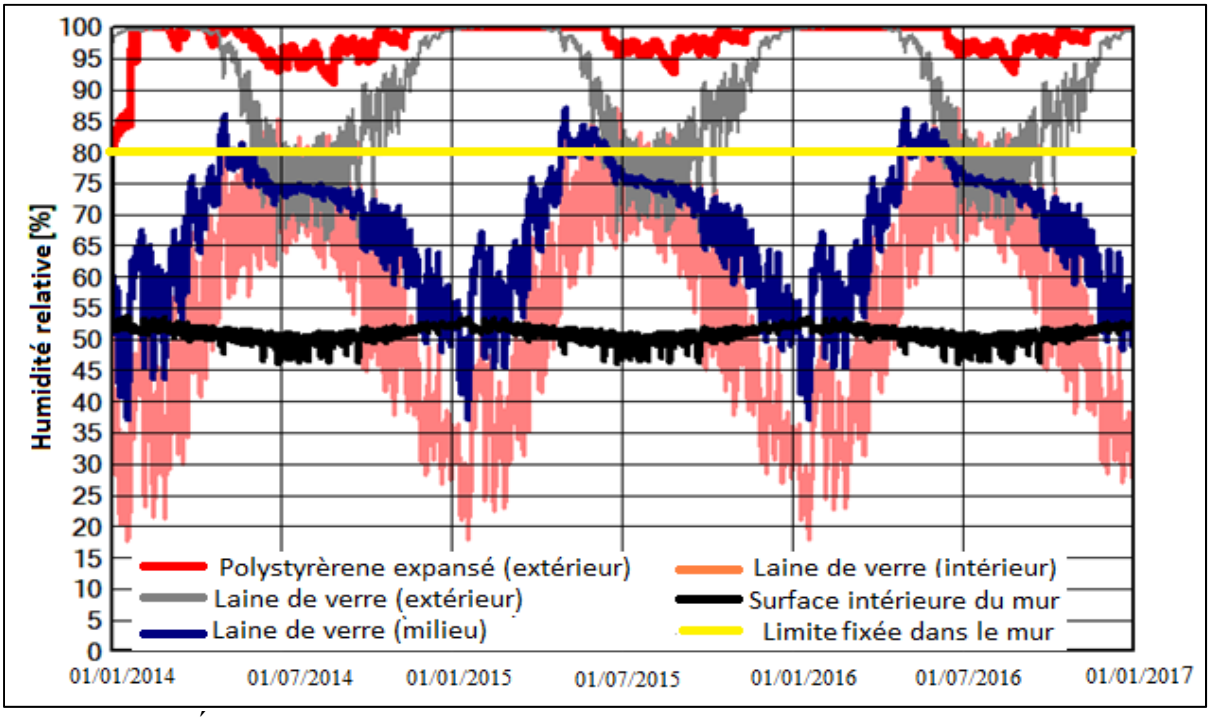


Figure 6.32 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 5 % : Cas standard

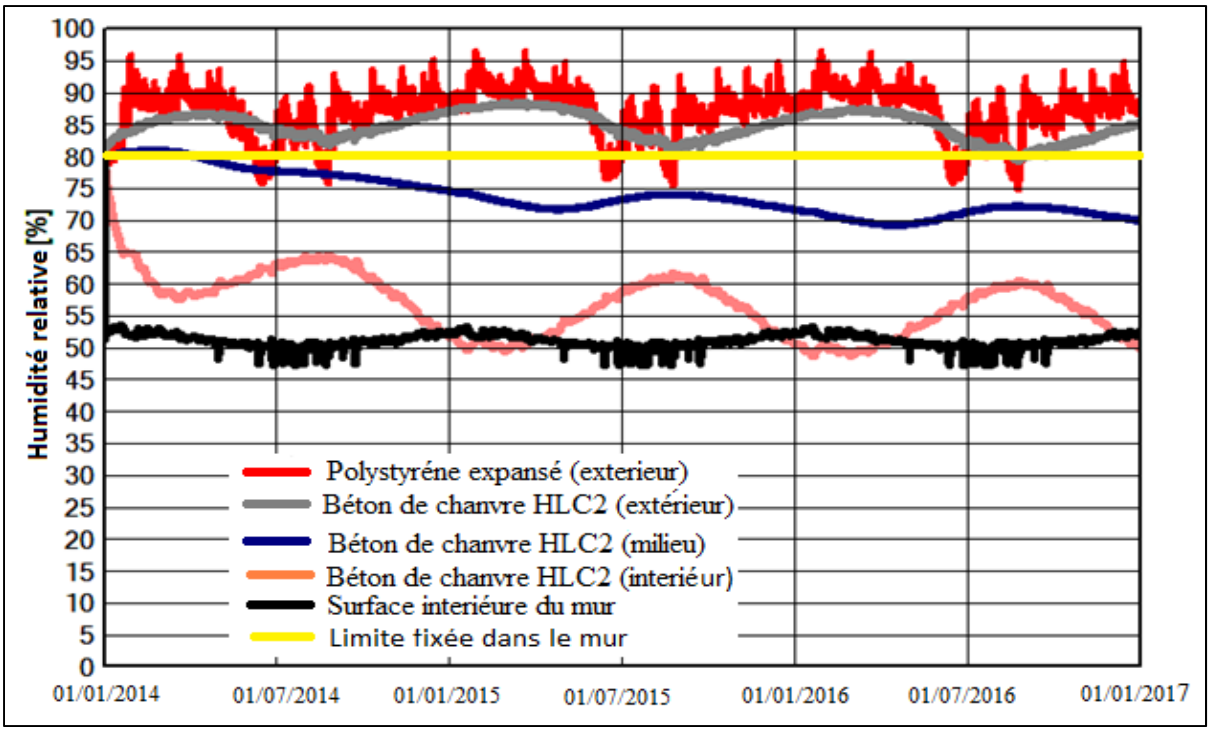


Figure 6.33 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 1 % : Cas 1

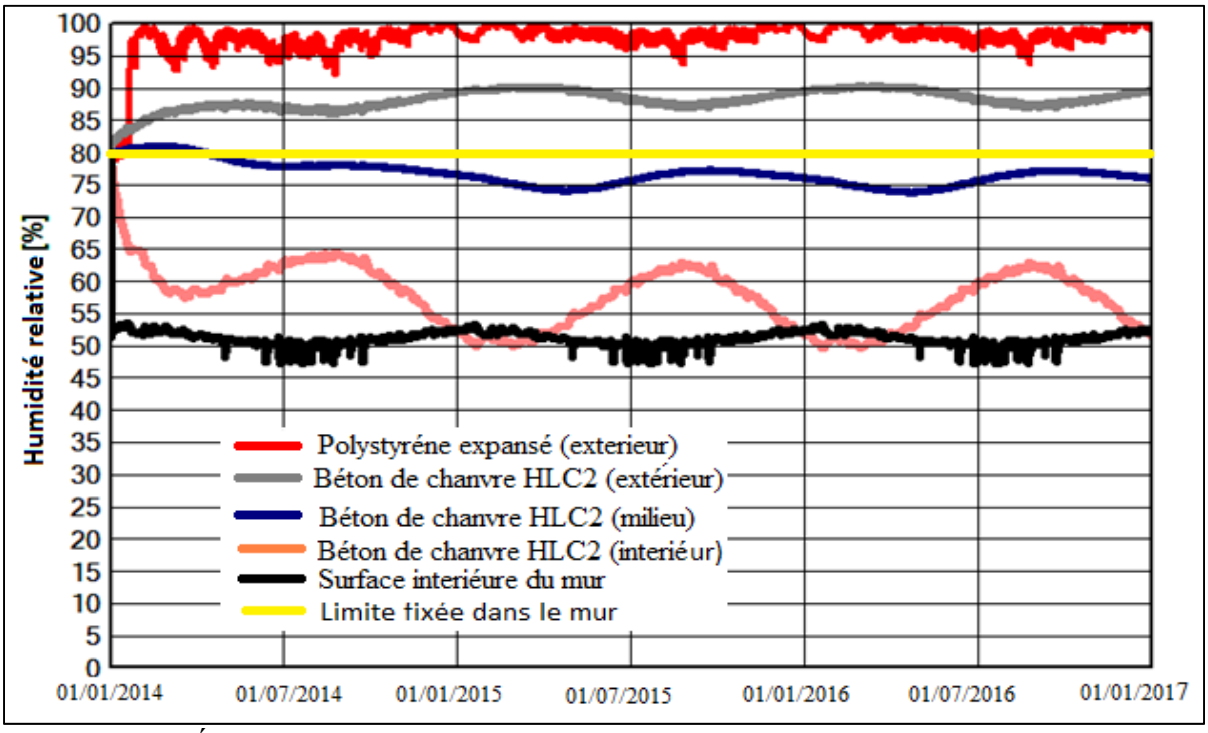


Figure 6.34 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 5 % : Cas 1

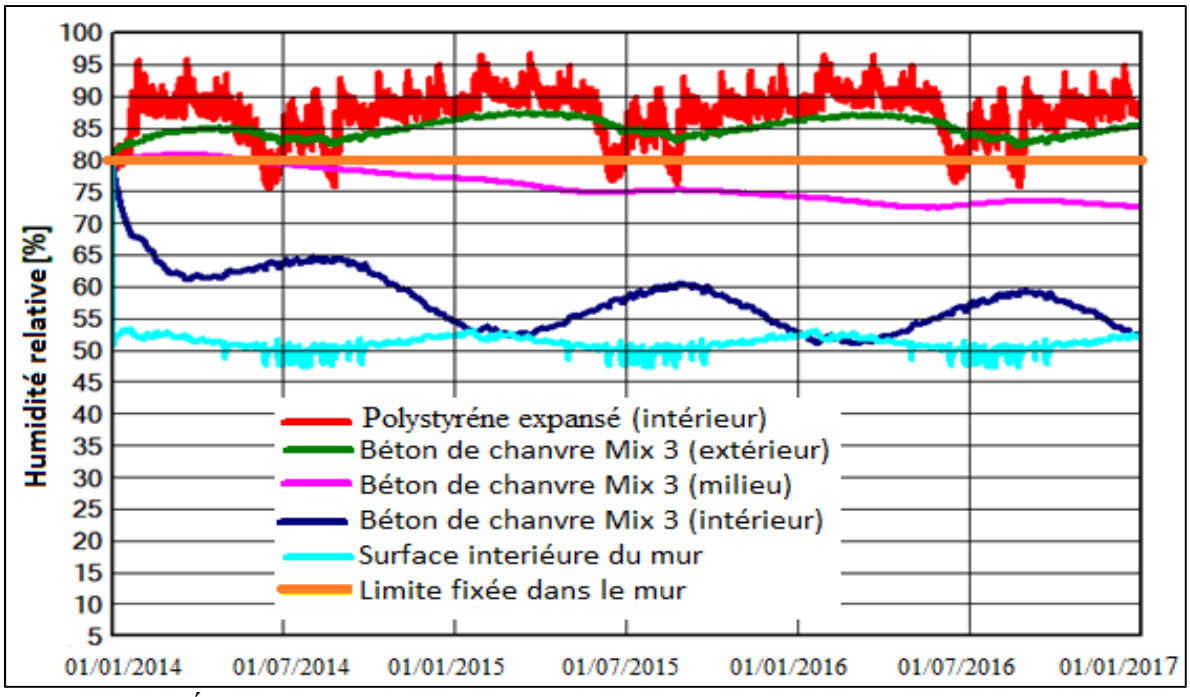


Figure 6.35 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 1 % : Cas 2

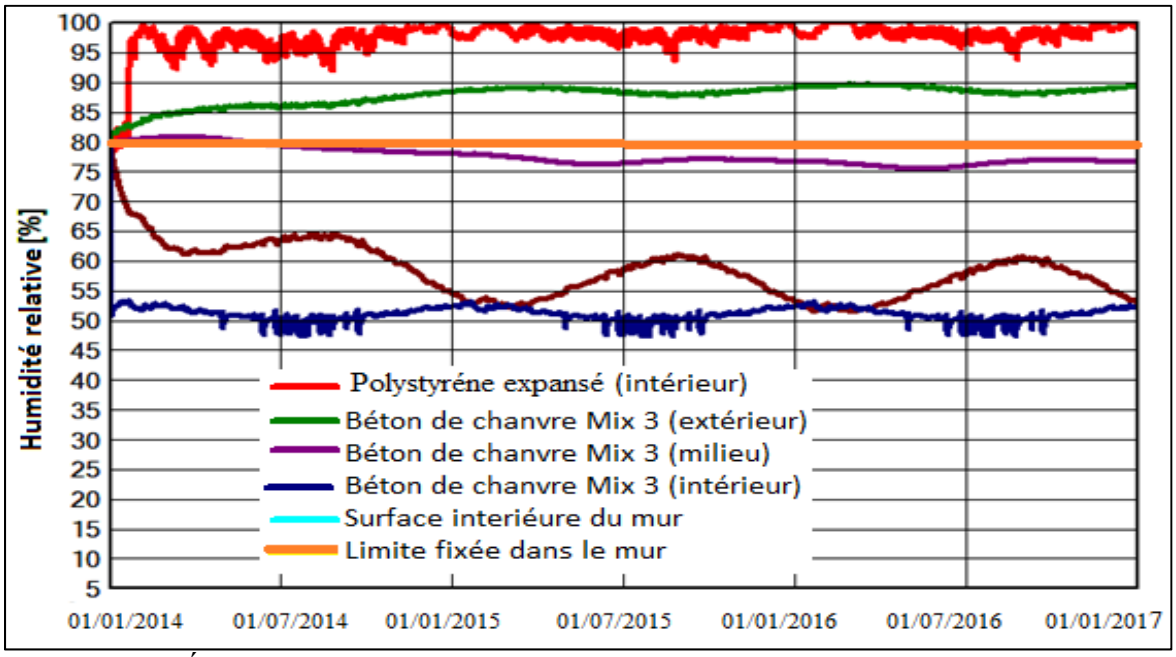


Figure 6.36 Évolution de l'humidité relation pour une fraction de pluie battante de 5 % : Cas 2

Que le mur soit conçu en laine en verre ou en béton de chanvre, une fraction de pluie battante supérieure à 1 % sur la surface extérieure des murs peut causer un risque de détérioration de l'enveloppe. Les figures ci-dessus montrent la variation de l'humidité relative des murs simulés et le risque de condensation est visible du fait que l'humidité relative de l'extérieur de la laine de verre et des deux bétons de chanvre est supérieure à 80 %. Le point de contrôle de l'humidité relative de l'intérieur du mur étant fixé à 50 % pour l'air intérieur du mur, les variations de l'humidité relative de la surface intérieure des murs en béton de chanvre et de la laine de verre sont acceptables. Cependant, le côté extérieur est à protéger contre la pluie battante.

6.2.2 Discussion des résultats des murs simulés par les données de la ville de Dori

En ce qui concerne l'atténuation de la chaleur dans le mur, le béton de chanvre et les briques en terre comprimées freinent assez bien la température extérieure qui pénètre dans le mur (Figure 6.37-cas2 et 6.37-cas3). Cependant, dans le cas 1 (Figure 6.37-cas1), on constate que le bloc de ciment est sujet à de plus grandes variations de la température qui arrivent à pénétrer dans le mur. La Figure 6.37 montre bien cette atténuation.

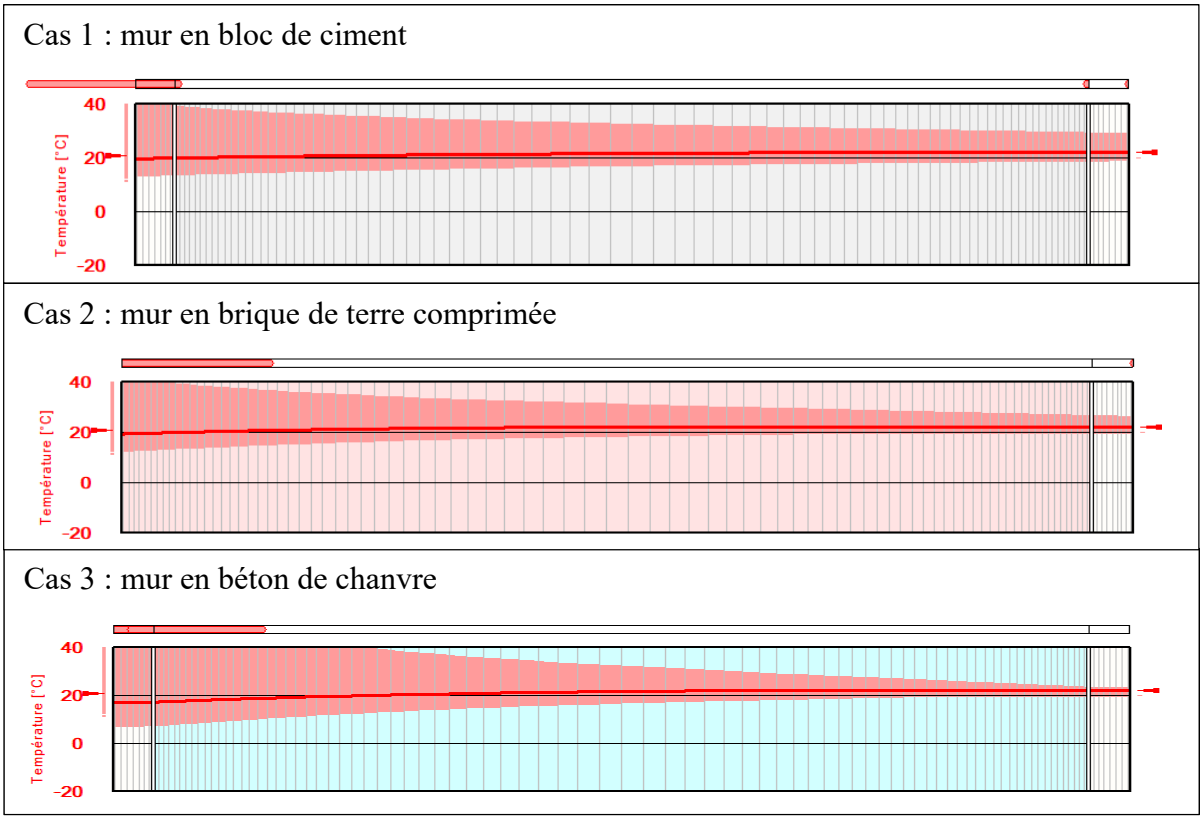


Figure 6.37 Atténuation de la température dans les murs pour une fraction de rayonnement solaire de 1 %

La Figure 6.37-cas 3 montre des températures plus élevées à une certaine profondeur du côté extérieur du mur et présente des températures intérieures plus faibles que les cas 1 et cas 2. La Figure 6.37-cas 3 montre que la température de la surface intérieure du mur est plus faible par rapport à la température intérieure des autres murs. Ce qui justifie les valeurs de 22°C à 24,5 °C pour la surface intérieure alors que la condition de la température initiale à l'intérieur des murs est fixée à 24°C. Le Tableau 6.4 montre que le béton de chanvre est performant en termes de régulation de la température et qu'on n'a pas besoin de climatisation quelque soit la température accumulée du côté extérieur, contrairement au bloc de ciment et à la brique de terre comprimée.

Tableau 6.4 Récapitulation de la variation de la température dans les matériaux

Fraction de rayonnement solaire incidente		Température		
		Extérieur de l'isolant	Milieu de l'isolant	Intérieur de l'isolant
Cas 1 : mur en bloc de ciment	1 %	15 à 35	18 à 31	20 à 29
	5 %	15 à 37	19 à 31	20 à 29
Cas 2 : mur en brique de terre	1 %	13 à 37	20 à 30	21 à 27
	5 %	13 à 38	20 à 30	22 à 27
Cas 3 : mur en béton de ciment	1 %	09 à 45	18 à 31	22 à 24,5
	5 %	09 à 49	19 à 31	22 à 24,5

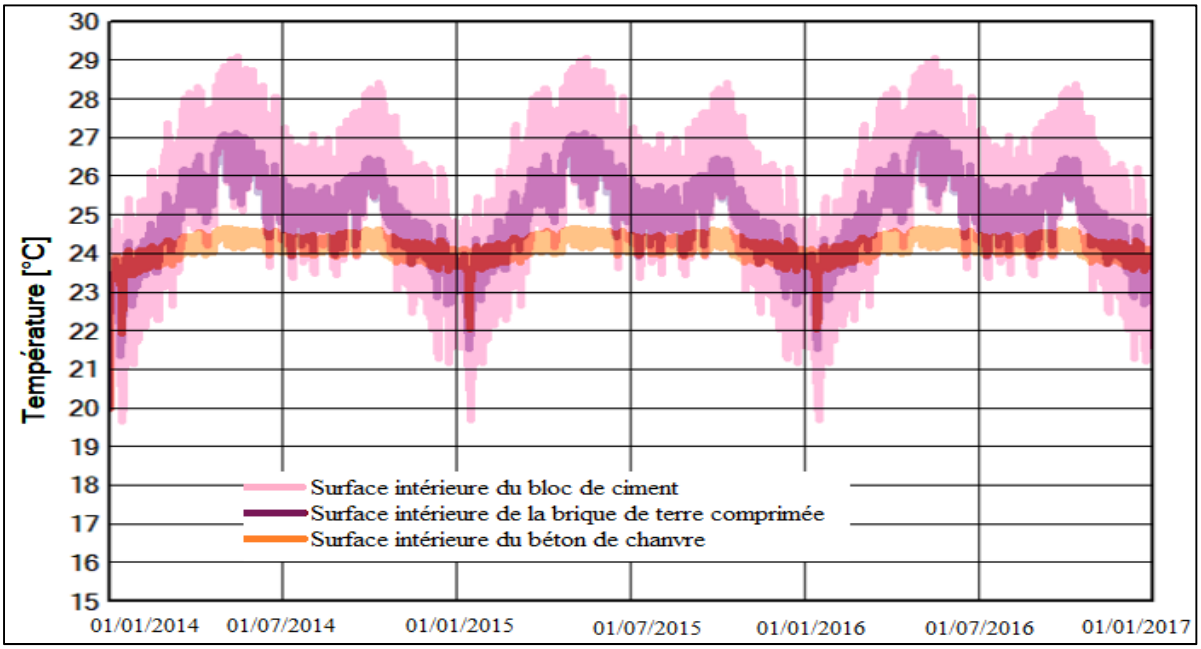


Figure 6.38 Température de la surface intérieure des matériaux pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 %

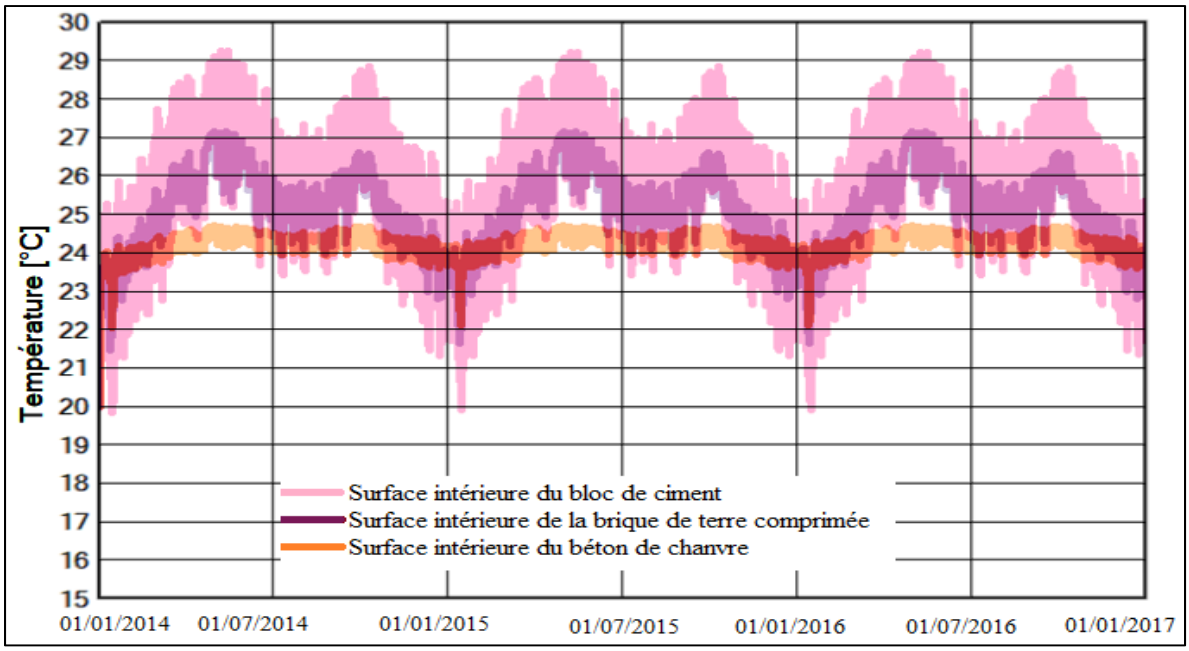


Figure 6.39 Température de la surface intérieure des matériaux pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 %

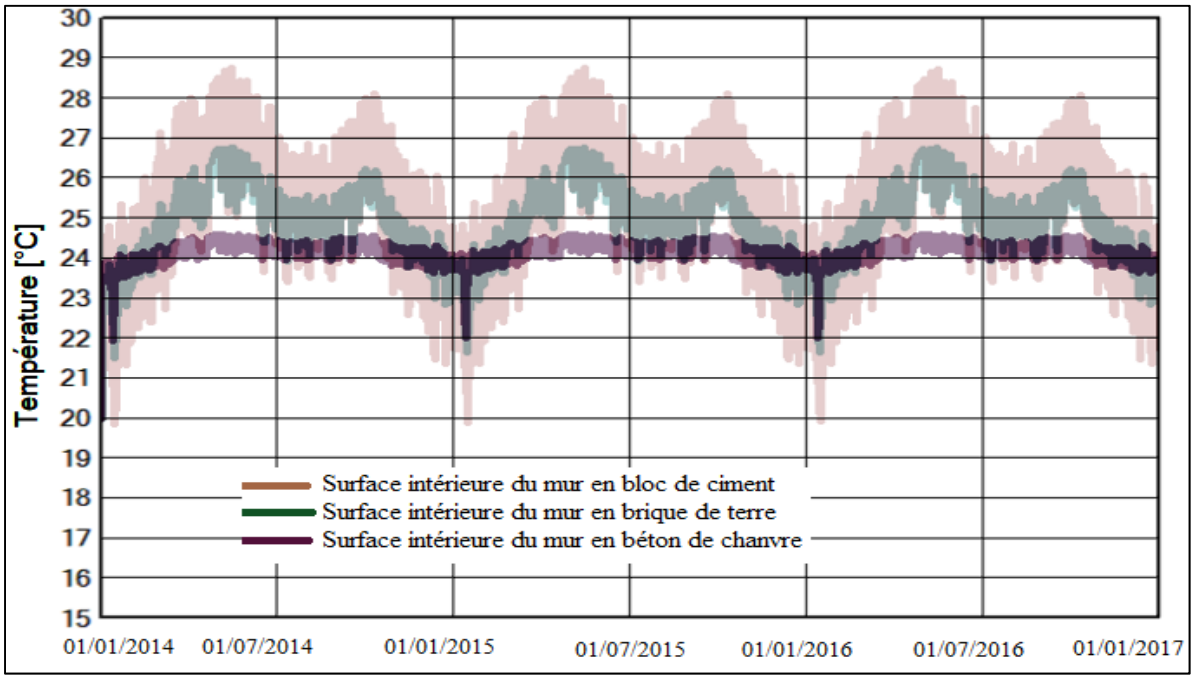


Figure 6.40 Température de la surface intérieure des murs pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 %

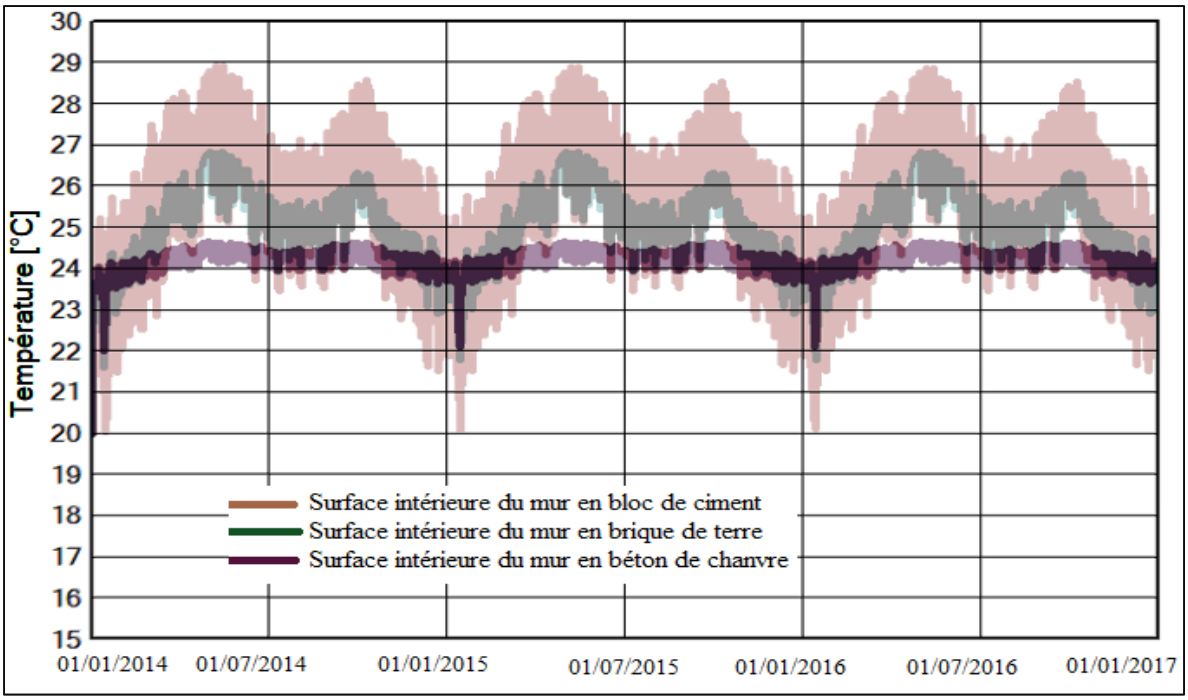


Figure 6.41 Température de la surface intérieure des murs pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 5 %

En ce qui concerne la température de la surface intérieure des murs et des matériaux, la différence est visible avec les Figures 6.38 à 6.41, le béton de chanvre atténue efficacement la chaleur qui pénètre dans le mur de 2,5°C par rapport à la brique de terre comprimée et de 4,5°C par rapport au bloc de ciment. Pour évaluer la capacité du béton de chanvre à réguler la température, une fraction de rayonnement solaire incidente de 20 % est envoyée du côté extérieur du mur et on observe la température intérieure du mur. La Figure 6.42 illustre l'évolution de la température intérieure du mur en béton de chanvre pour 20 % de fraction de rayonnement solaire.

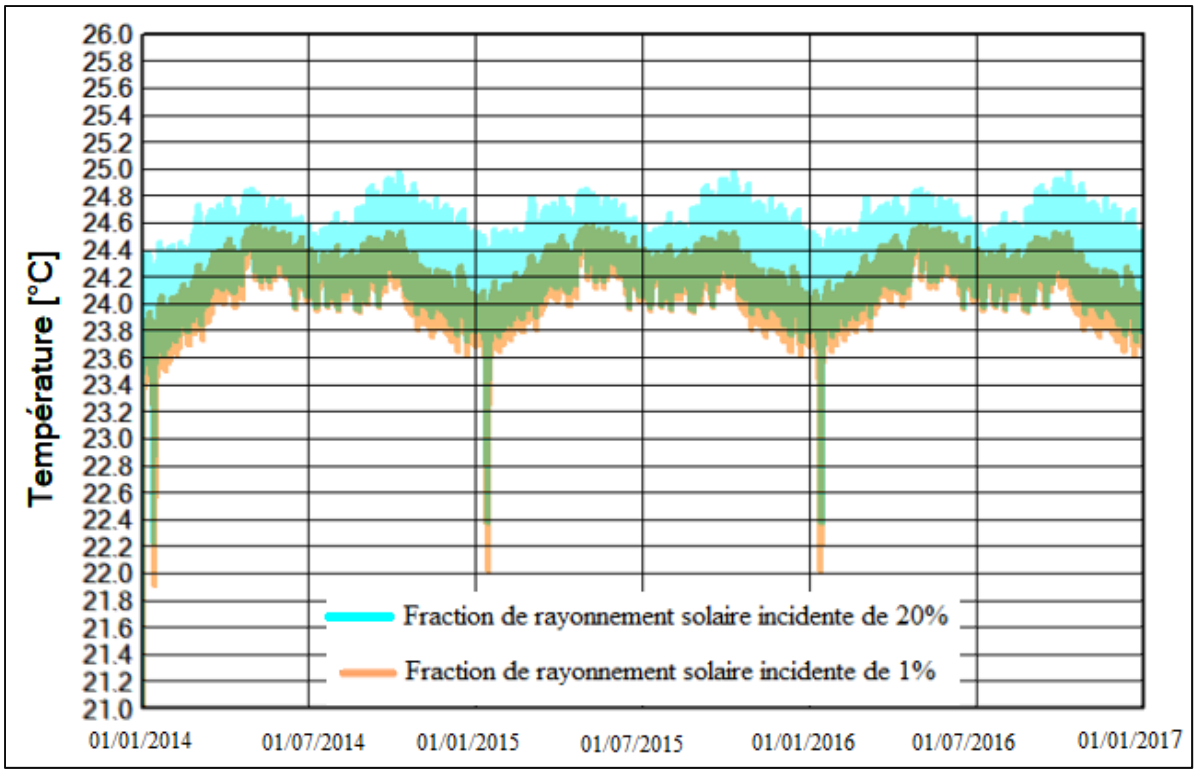


Figure 6.42 Température de la surface intérieure du mur en béton de chanvre

La Figure 6.42 montre que la température intérieure du mur en béton de chanvre ne dépasse pas 25°C même pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 20 %, alors que la température au niveau de la surface intérieure du mur en brique de terre comprimée est de 27°C et celle du mur en bloc de ciment de 29°C pour une fraction de rayonnement solaire incidente de 1 %. Donc, nous pouvons conclure à travers cette étude que le béton de chanvre est un matériau qui pourra réduire la demande en climatisation. Il pourrait être adapté au climat du Burkina Faso, donc pour une construction en Afrique de l'Ouest car il est un matériau qui régule efficacement la température intérieure.

Conclusion du chapitre 6

Pour donner suite aux différentes simulations, le matériau de béton de chanvre ne semble pas rencontrer de problème au niveau hygrothermique pour des applications de mise en œuvre des enveloppes du bâtiment en Amérique du Nord, plus précisément à Montréal si le taux d'infiltration est de 1 min 3 s/m^2 h ou moins. Cependant, dépassé cette valeur, il peut y avoir

de condensation superficielle extérieur des bétons de chanvre. La caractéristique la plus importante à retenir pour le béton de chanvre est sa capacité à réguler la température de l'ambiance intérieure d'un bâtiment. Le béton de chanvre en tant que matériau de construction au Burkina Faso, est une option beaucoup plus intéressante que la brique de terre comprimée. Intégrer ce béton dans la construction burkinabé contribue à la réduction de la consommation énergétique des bâtiments due à la climatisation.

Il est évident que les résultats présentés ne sont pas rigoureusement exacts du fait qu'il s'agit d'une simulation numérique qui est basée sur de nombreuses hypothèses, et avec un manque de certaines données climatiques pour les cas burkinabés. Pour obtenir des résultats plus réalistes, il est nécessaire de faire une étude expérimentale afin de comparer ces résultats aux résultats obtenus par simulation numérique.

EST-CE QUE LES OBJECTIFS SONT ATTEINTS?

Objectif principal :

Évaluation de la performance énergétique et hygrothermique du béton de chanvre en tant que matériau de construction. ✓

Objectifs secondaires:

- Trouver une alternative de construction traditionnelle par intégration du béton de chanvre dans la structure des bâtiments; ✓
- Comprendre le comportement hygrothermique du béton de chanvre intégré dans la structure des bâtiments de ces deux pays contrastés. ✓

CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était de faire une étude par modélisation numérique du comportement hygrothermique du béton de chanvre en tant que matériau de construction pour la ville de Dori (Burkina Faso) et un isolant pour la ville de Montréal (Québec) et de voir s'il peut constituer potentiellement une alternative sérieuse comme matériau de construction durable en Afrique de l'Ouest ou en Amérique du Nord. Une revue de la littérature approfondie été réalisée pour comprendre les paramètres hygrothermiques du béton de chanvre pour son application dans l'enveloppe du bâtiment. Après cette revue de la littérature, les meilleures valeurs des propriétés hygrothermiques du béton de chanvre sont utilisées pour la modélisation de l'enveloppe du bâtiment avec le logiciel WUFI Pro 6.2. Le béton de chanvre Mix3 formulé par Dhakal, (2017) en contexte canadien a été utilisé pour Montréal et le béton de chanvre HLC2 formulé par (Samri, 2008) en contexte français a été utilisés pour Dori et Montréal. L'étude a montré qu'en raison de sa très bonne perméabilité à la vapeur d'eau (U = 3,6 à 4,85), le béton de chanvre permet d'avoir des murs qui respirent. Quel que soit la température extérieure, les murs en béton de chanvre créent une ambiance saine au sein du bâtiment. Il est un bon isolant du point de vue de la régulation de la température. Sa conductivité thermique comprise entre 0,06 W/m K et 0,13 W/m K lui confère la propriété d'un bon isolant.

Pour les murs de la ville de Montréal, la simulation avec le logiciel WUFI Pro 6.2 a révélé qu'il n'existe pas de problème de condensation d'eau ni de pourriture à l'intérieur des murs en béton de chanvre. Cependant, le côté extérieur est sensible à l'humidité extérieure ou à tout risque de pénétration d'eau. Il est très important de protéger le mur pour éviter toute pénétration d'eau. Toutefois, les points forts des deux bétons de chanvre relevés après la simulation sont leur excellente régulation de l'humidité intérieure et de la température intérieure. L'utilisation du béton de chanvre dans la construction présente une grande avantage d'offrir un bon confort aux occupants grâce à sa capacité à réguler la température et l'humidité intérieure pendant les période plus chaudes et humides de l'année si ces murs sont bien protégés contre l'infiltration d'eau.

Pour la ville de Dori au Burkina Faso, les résultats de la simulation des murs en béton de chanvre sont très satisfaisants comparativement aux murs typiques en bloc de ciment et brique de terre comprimée. Pour des températures extérieures de plus de 40°C, la température de la surface intérieure du béton de chanvre est de 24,5°C en été alors que la température de la surface intérieure de la brique de terre comprimée est de 27°C et celle du bloc de ciment de 29°C . Les résultats de la simulation montrent que le béton de chanvre peut être utilisé dans la construction des murs typiques dans les pays chauds quel que soit les fractions rayonnement solaire qui arrivent sur la surface extérieure des murs. En conclusion, le béton de chanvre semble être effectivement une alternative prometteuse pour la construction au Burkina Faso et au Canada.

Cependant, en raison de certains paramètres non maîtrisés au niveau du béton de chanvre dans le contexte canadien, le manque de données climatiques sur l'indice de nuage, le rayonnement solaire direct et diffus pour la ville de Dori ainsi que le manque d'une étude expérimentale, ne permet pas de confirmer de manière exacte la bonne performance hygrothermique du béton de chanvre. De plus, la présente étude de simulation numérique s'est concentrée uniquement sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre afin de vérifier sa performance à réguler l'humidité et la température.

RECOMMANDATIONS

Pour compléter cette recherche, une étude expérimentale est nécessaire pour valider le modèle numérique avant d'affirmer la performance hygrothermique du béton de chanvre en tant que matériau de construction dans le contexte canadien et burkinabé.

Il est aussi important d'étudier les caractéristiques mécaniques et physiques du béton de chanvre dans les conditions climatiques canadienne et burkinabé pour que ce travail soit plus complet.

En plus des études expérimentales proposées, des études sur les matériaux biosourcés existant au Burkina Faso sont nécessaires afin de valoriser ces matériaux dans le domaine de la construction. Ces matériaux biosourcés sont tels que les fibres de coton, le déchet des grains de coton après extraction de l'huile et les tiges des cotons après cueillette des cotons, le déchet du riz, etc. peuvent être des sujets d'étude sur les performances mécaniques, physiques et hygrothermiques. Des liants différents peuvent être utilisée pour la formulation, la chaux, la terre et le ciment ou combinaison terre-ciment et terre-chaux afin d'analyser en premier lieu leur performance mécanique avant de poursuivre avec une évaluation hygrothermique.

Il est aussi important de faire une étude de cycle de vie afin de quantifier la quantité de CO_2 stocké par m^2 de mur durant le cycle du bâtiment pour les murs en béton de chanvre. De ce fait, pour une étude des matériaux biosourcés existants au Burkina Faso, l'étude du cycle de vie doit être incluse.

ANNEXE I

DÉFINITION DES NORMES PRÉSENTENT DANS LE LOGICIEL WUFI Pro 6.2

❖ Norme [EN 15 026/WTA 6-2]

La norme européenne [EN 15 026/WTA 6-2] a pour objectif d'évaluer la performance hygrothermique des composants de l'enveloppe du bâtiment par simulation numérique.
Elle définit l'application pratique des logiciels de simulation hygrothermique transitoire utilisés pour la prédiction des transferts de chaleur et d'humidité transitoire unidimensionnelle dans les composants monocouches et multicouches de l'enveloppe du bâtiment soumis à des conditions climatiques réelles (Hartwing M. Künzel, 2012 ; Norme Européenne ILNAS-EN 15026, 2007). Les modèles transitoires relevant de la norme [EN 15 026] prennent en compte le stockage de chaleur et d'humidité, les effets de chaleur latente et les transferts liquides et convectifs dans les conditions initiales et réalistes (Moissette & Bart, 2009 ; Norme Européenne ILNAS-EN 15026, 2007).

Les équations hygrothermiques utilisées dans cette norme ne doivent pas être appliquées dans le cas où (Hartwing M. Künzel, 2012) :

- La convection a lieu à travers des trous et des fissures ;
- Les effets bidimensionnels jouent un rôle important (humidité ascendante, conditions entourant les ponts thermiques, les effets des forces gravitationnelles) ;
- Des forces hydrauliques, osmotiques et électro phorétiques sont présentes ;
- Les températures moyennes dans les composants dépassent 50℃

❖ Norme [ISO 13788]

La norme européenne [ISO 13788] propose un algorithme pour le calcul de
l'humidité de l'air intérieure à partir de l'humidité extérieure en utilisant une charge d'humidité variable qui est fonction de la température extérieure (D.Zirkelbach, Th.Schmidt, M.Kehrer, & Kunzel, s.d). Elle établit des méthodes de calcul permettant de déterminer la

température superficielle intérieure des composants ou de l'enveloppe du bâtiment, les risques de condensation dans la masse due à la diffusion de la vapeur d'eau (LILLE, 2013 ; Rhônalpénergie-Environnement, s.d).

- Calcul de l'humidité type de construction, la teneur en eau saturante Ws et la teneur en eau maximale Wmax

Le calcul de l'humidité type de construction est égal à la différence entre la densité du matériau avant séchage (premier jour de séchage) et la densité à sec.
Procédure de calcul :
W_c= Densité avant séchage (figure 1.22) - densité (sec)

$W_{cA\ (Collet)}$ = 672 kg/m3 - 390 kg/m3 = 282 kg/m^3

$W_{cB\ (Collet)}$ = 672 kg/m3 - 425 kg/m3 = 247 kg/m^3

$W_{cHLC1\ (Samri)}$ = 672 kg/m3 - 430 kg/m3 = 242 kg/m^3

$W_{cHLC2\ (Samri)}$ = 672 kg/m3 - 317 kg/m3 = 355 kg/m

ANNEXE II

GUIDE D'UTILISATION DU LOGICIEL WUFI Pro 6.2 ET RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES SIMULATION (MODÉLISATION WUFI PRO 6.2)

II.1. WUFI Pro 6.2_encodage cas standard

Pour utiliser le logiciel WUFI Pro 6.2, plusieurs paramètres sont pris en compte, l'orientation et l'inclinaison de la paroi à étudier, le choix de la période de simulation et de la zone d'étude sur la carte ou par fiche climatique. Après ce choix, le logiciel WUFI Pro 6.2 affiche le profil de la température et du taux d'humidité extérieur, de radiation solaire et de la pluie battante pour les données climatiques choisies. Premièrement, il est important de concevoir l'enveloppe dans WUFI 6.2. La figure II.1 illustre la conception de l'enveloppe dans WUFI Pro 6.2

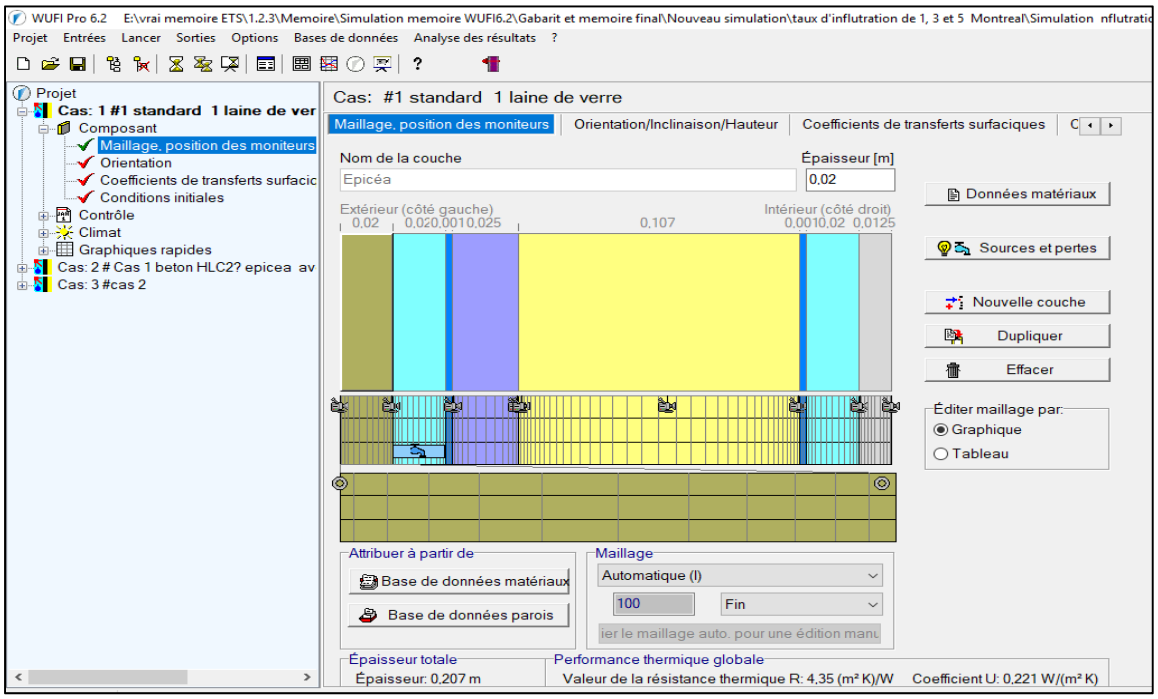


Figure-A II-1 conception de l'enveloppe dans WUFI Pro 6.2 pour le cas standard_Montréal

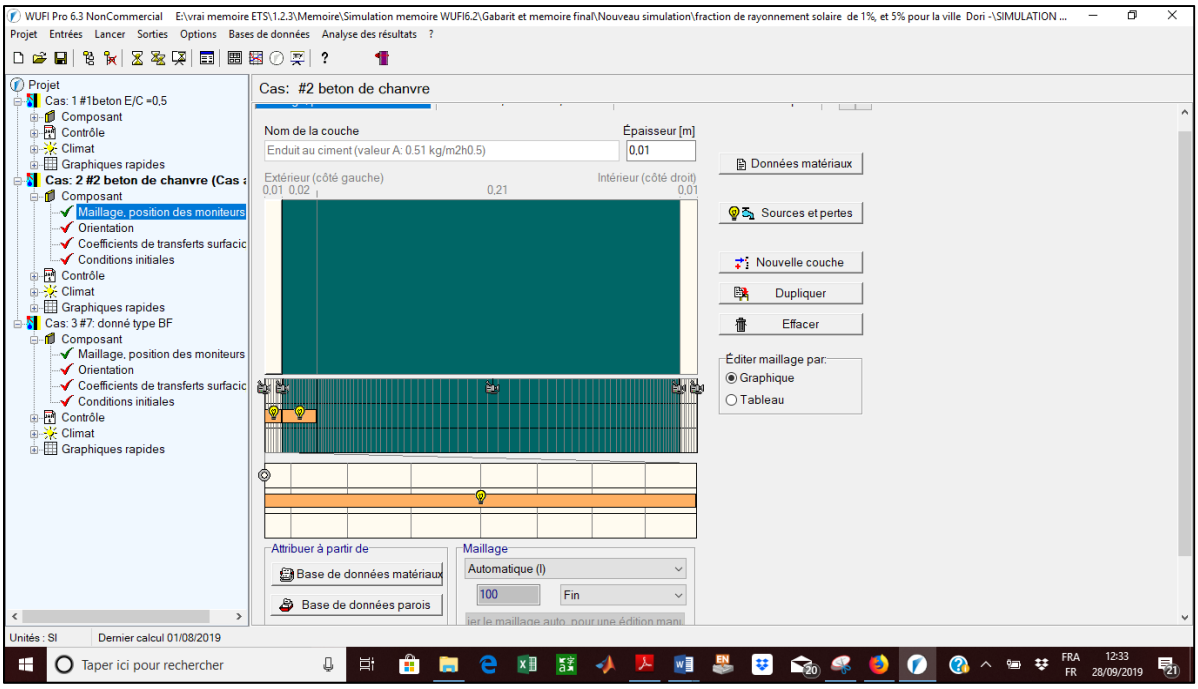


Figure-A II-2 Conception de l'enveloppe dans WUFI Pro 6.2 pour le cas 3_Dori

Ensuite on passe on choix de l'orientation du mur. Avant le choix de l'orientation, une analyse des données climatique est nécessaire afin de choisir l'orientation le pire en termes de pluie battante et de la fraction du rayonnement solaire qui arrive sur le mur.

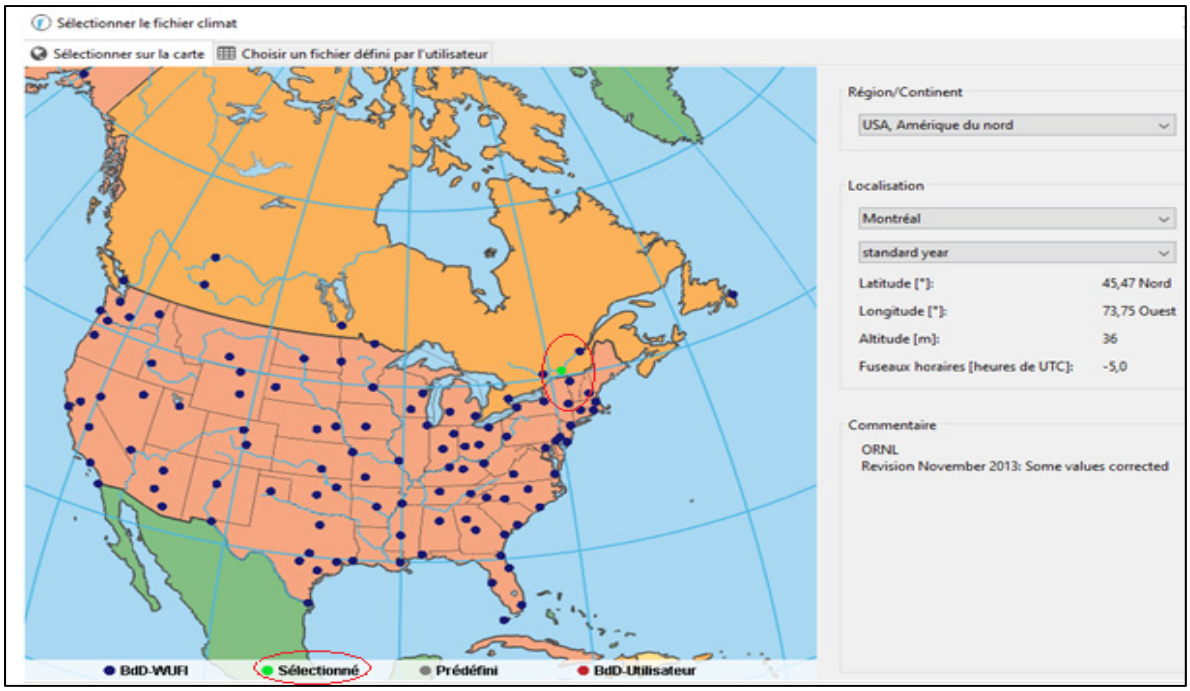


Figure-A II-3 Choix de la zone d'étude sur la carte, ville de Montréal

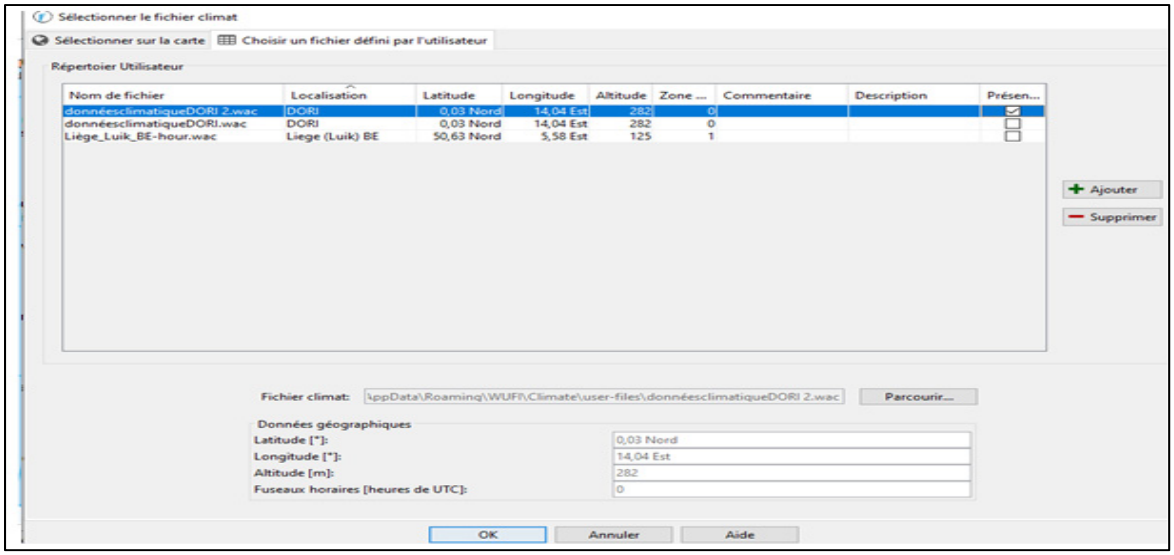


Figure-A II-4 Choix de la zone d'étude en utilisant le fichier climatique pour la ville de Dori

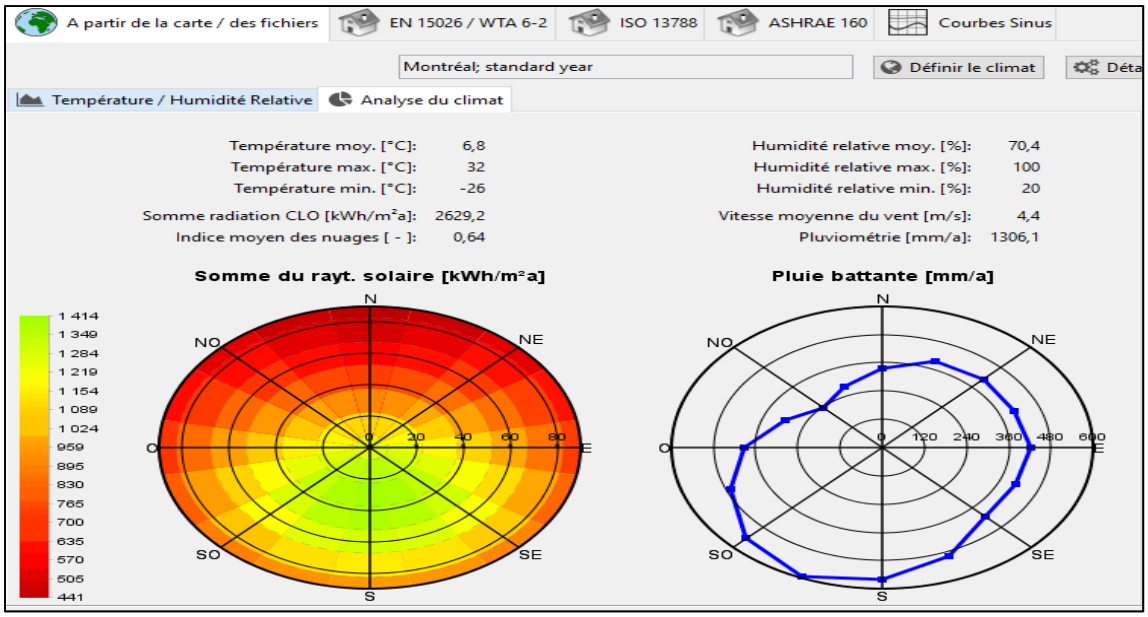


Figure A-II-5 Profil de radiation solaire et profil de la pluie battante pour la ville Montréal analysés par WUFI Pro 6.2 pour le pire cas de pluie battante et exposition de soleil

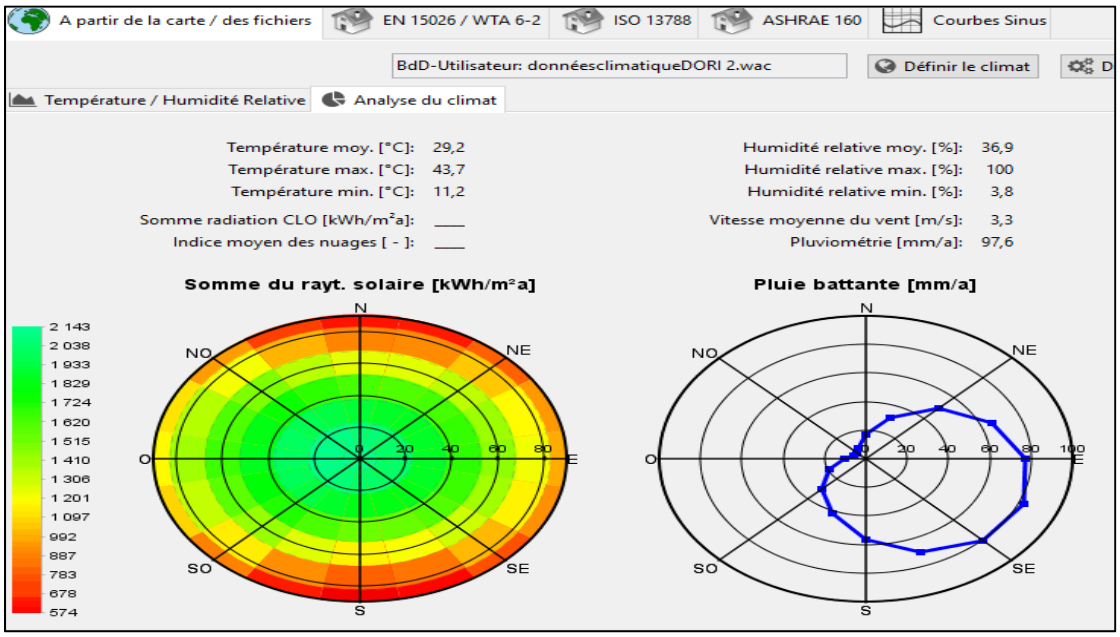


Figure-A II-6 Profil de radiation solaire et la pluie battante pour la ville Dori analysés par WUFI Pro 6.2 pour le pire cas de pluie battante et exposition de soleil

Comme nous l'observons sur la figure II.6, les données sur l'indice des nuages n'étant pas disponibles dans le fichier climatique fourni par la station météorologique de Ouagadougou

au Burkina Faso, l'indice moyen de nuages a été pris par défaut pour la simulation. C'est une incertitude que nous pouvons utiliser dans l'analyse. Concernant le rayonnement solaire, seul le rayonnement global est disponible dans le fichier climatique et a été utilisé dans cette étude par manque de données du rayonnement diffus et direct. En effet, après avoir posé plusieurs questions et obtenu des réponses à ces questions par WUFI Support pour le manque des données sur le rayonnement diffus et direct et la partie de l'enveloppe à simuler. Comme réponse reçue : « pour une simulation des surfaces horizontales des murs, les données du rayonnement global sont suffisantes pour satisfaire l'étude ». En effet, pour une étude de la toiture, des surfaces inclinées ou une partie du mur incliné, il est nécessaire d'avoir des données du rayonnement diffus et direct pour obtenir des résultats satisfaisants.

Les figure II.5 et II.6 nous permet de faire le choix de l'orientation de notre enveloppe. Pour la ville de Montréal, deux choix est possible, l'orientation sud-ouest et sud.

Pour la ville de Dori, au Burkina Faso, deux choix aussi possible, l'orientation Est et sud- est.

Notre choix pour les murs de Montréal est le sud-ouest et pour les murs de Dori sud-est.

Les figures II.7 et II.8 illustrent ces choix.

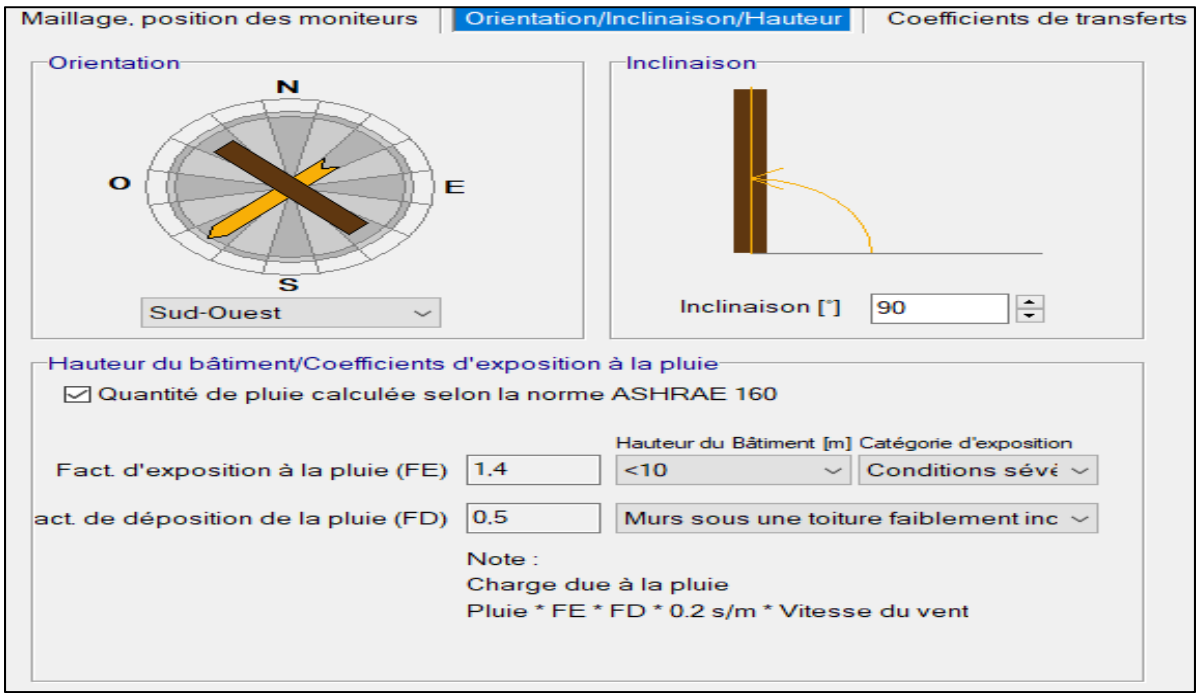


Figure-A II-7 Orientation et inclinaison des murs d'étude pour la ville de Montréal

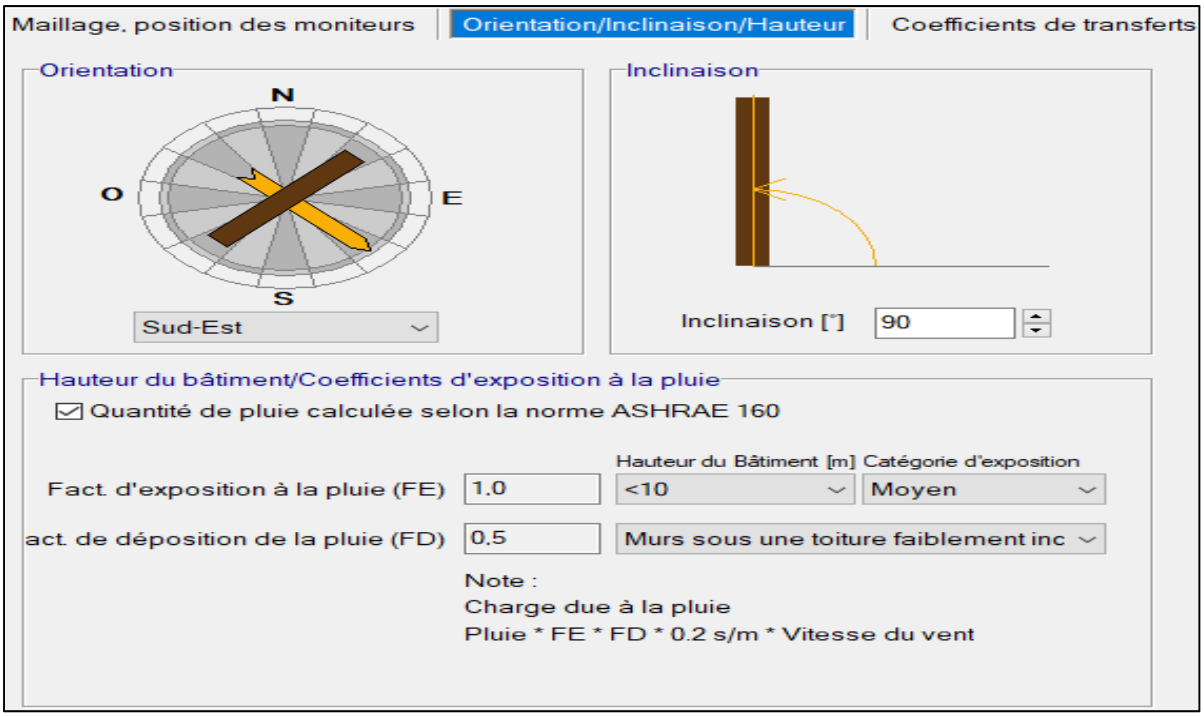


Figure-A II-8 Orientation et inclinaison des murs d'étude pour la ville de Dori

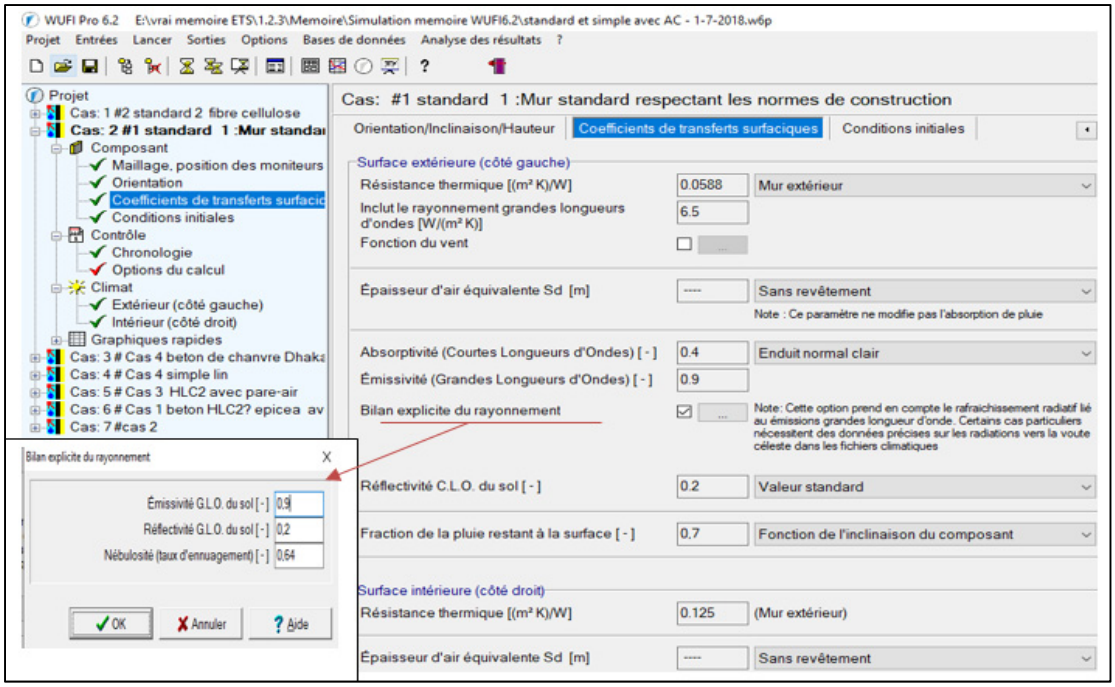


Figure-A II-9 Choix des coefficients de transferts surfacique

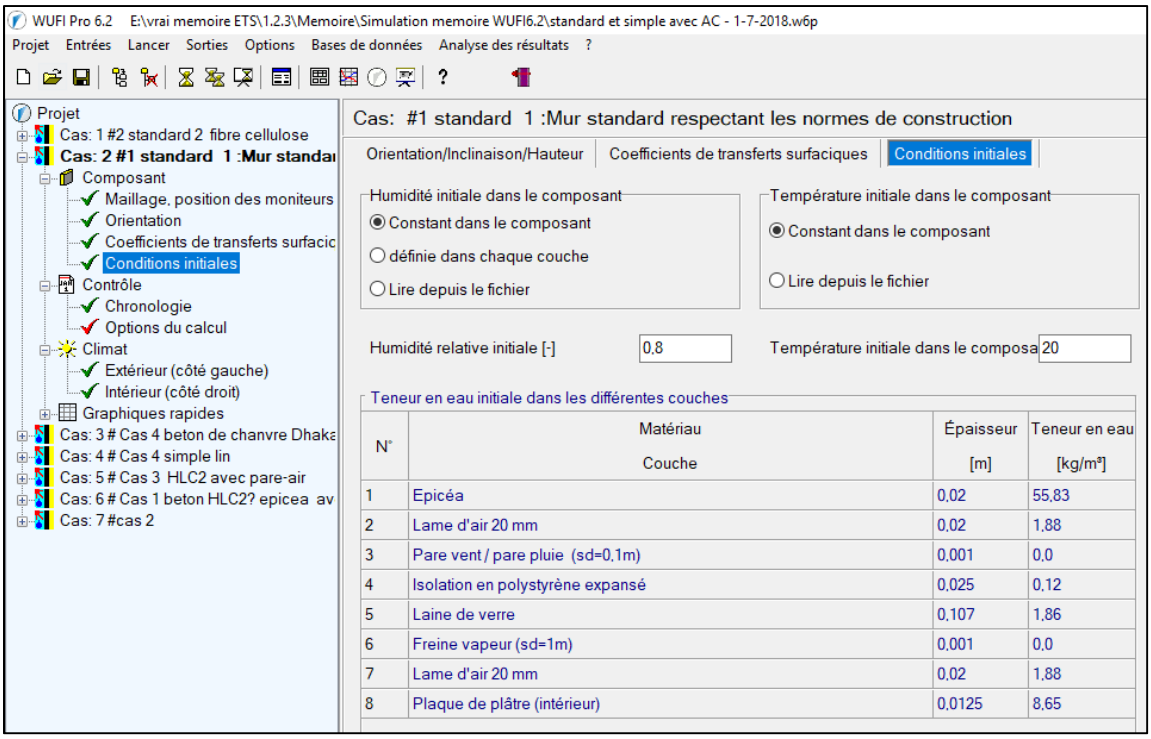


Figure-A II-10 conditions aux limites dans les murs

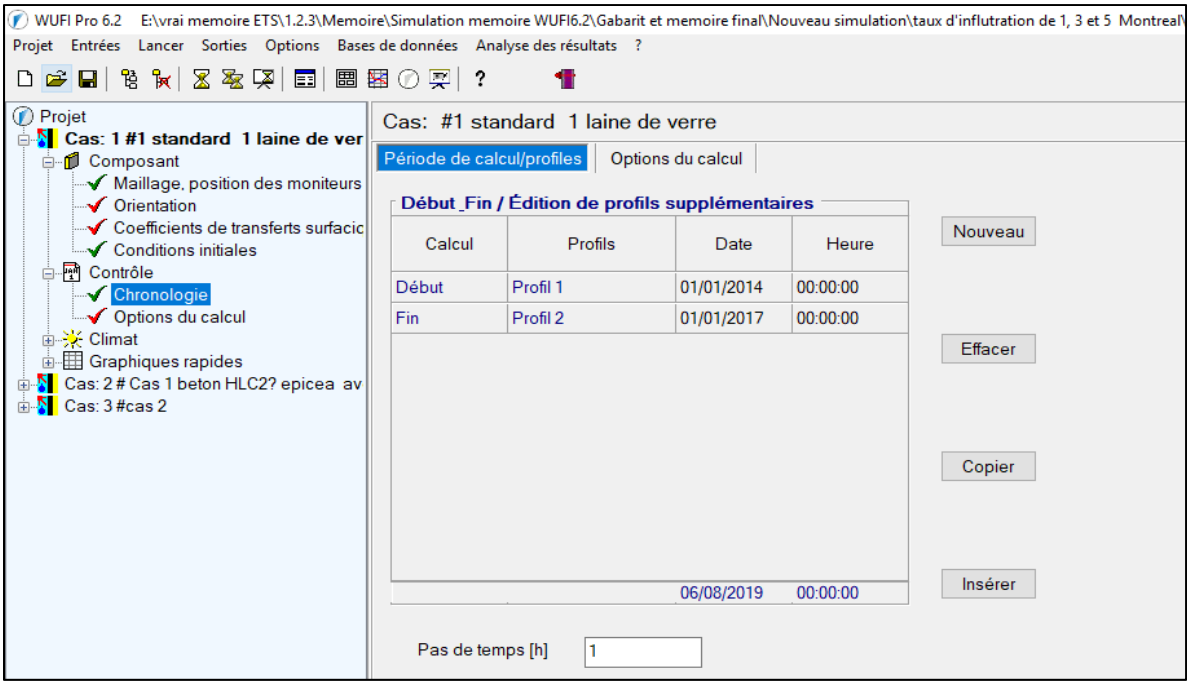


Figure-A II-11 Période de calcul

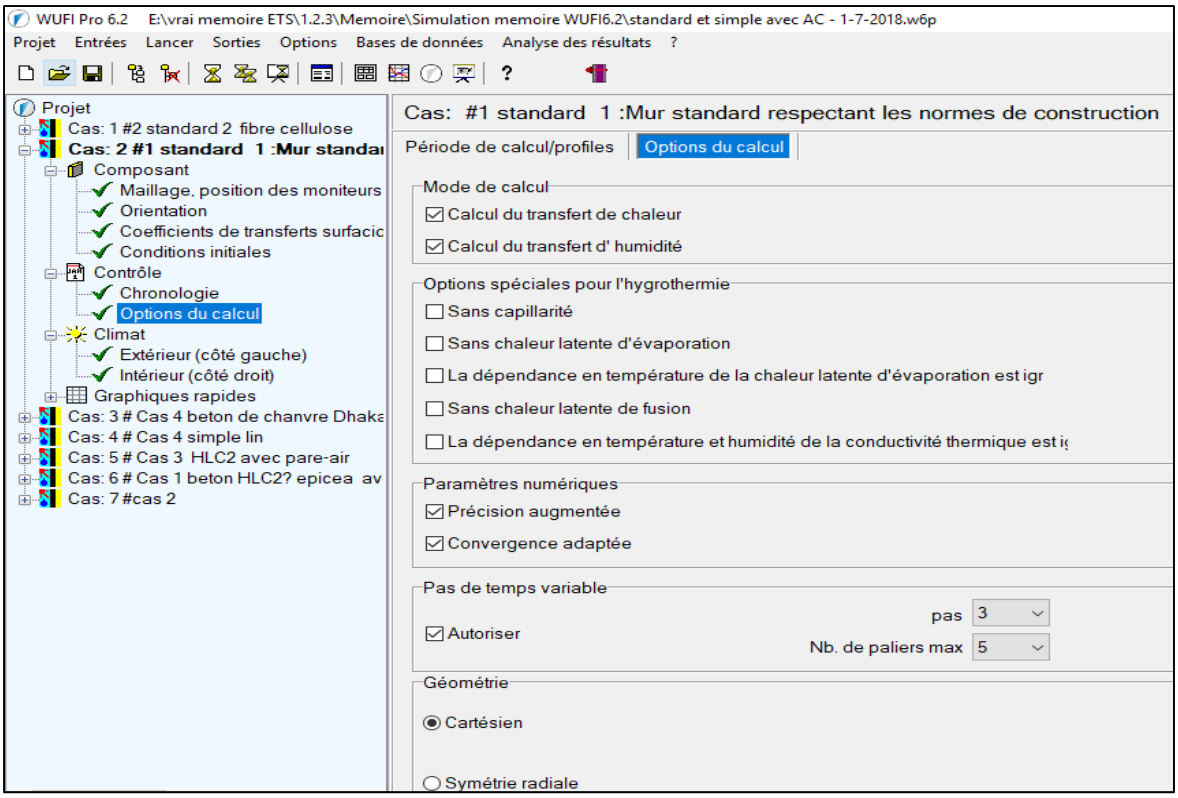
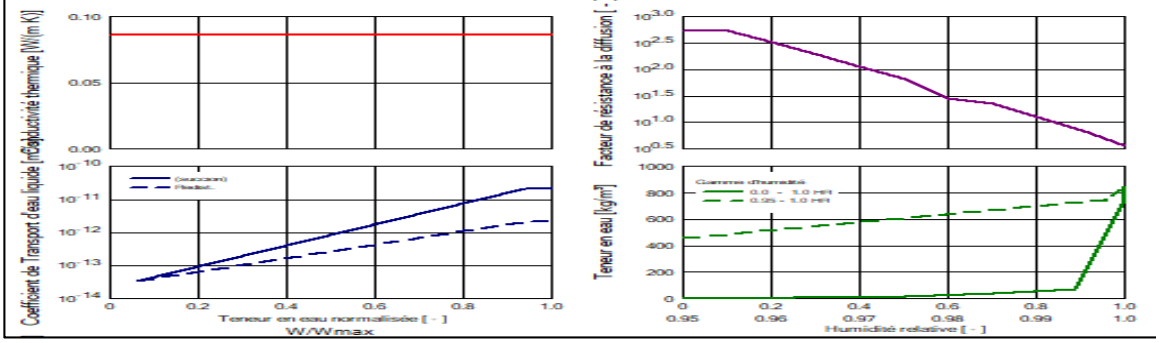


Figure-A II-12 Option de calcul

II.2. WUFI Pro 6.2 _Matériaux

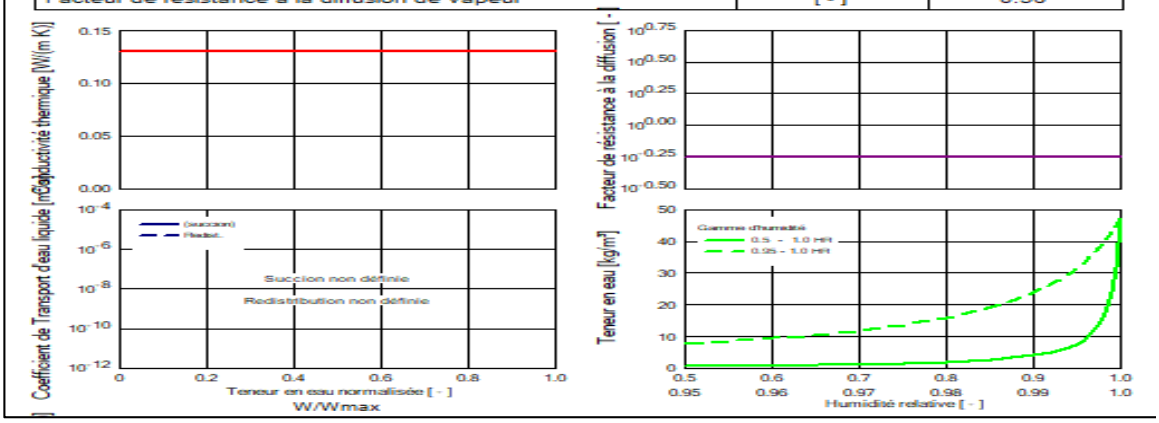
Matériaux: Epicéa

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	400
Porosité	[m³/m³]	0.9
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1880
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.086
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	552
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m³]	55.8
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m³]	845
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m² s^0.5)]	0.002
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



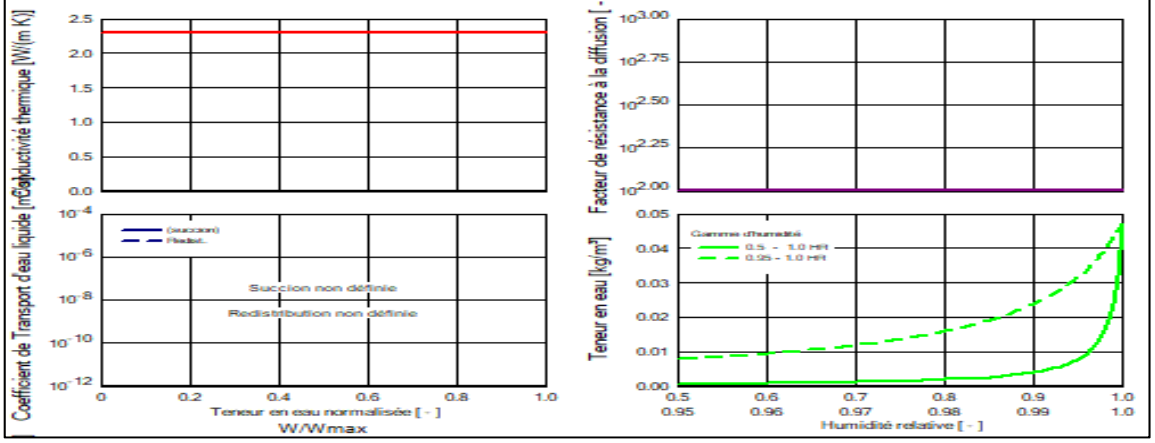
Matériaux: Lame d'air 20 mm

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	1.3
Porosité	[m³/m³]	0.999
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1000
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.13
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	0.56



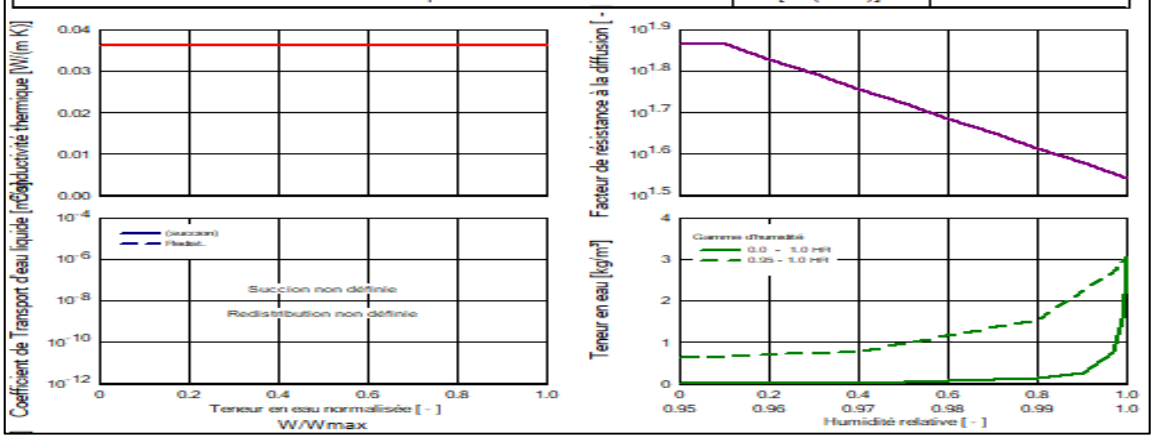
Matériaux: Pare vent / pare pluie (sd=0.1m)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	130
Porosité	[m³/m³]	0.001
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2300
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	2.3
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	100
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



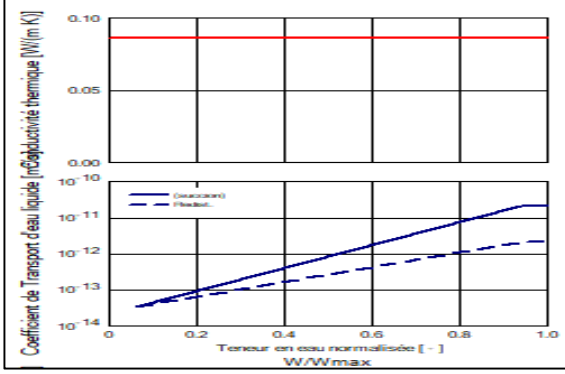
Matériaux: Isolation en polystyrène expansé

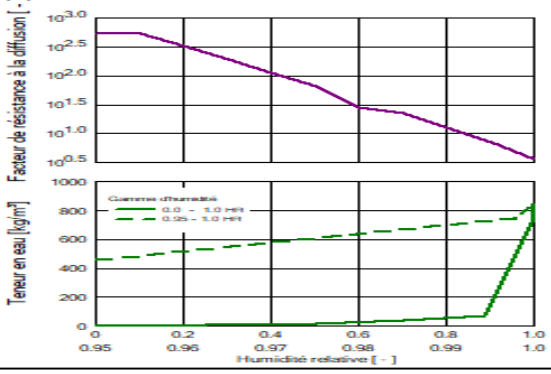
Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	14.8
Porosité	[m³/m³]	0.99
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1470
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.036
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	73.01
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



Matériaux: Epicéa

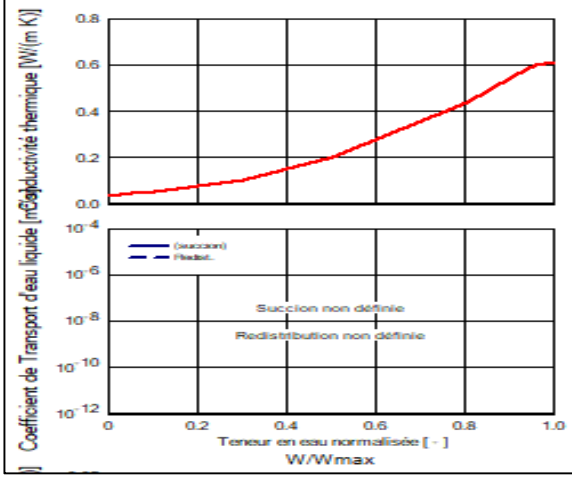
Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	400
Porosité	[m³/m³]	0.9
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1880
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.086
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	552
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m³]	55.8
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m³]	845
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m² s^0.5)]	0.002
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002

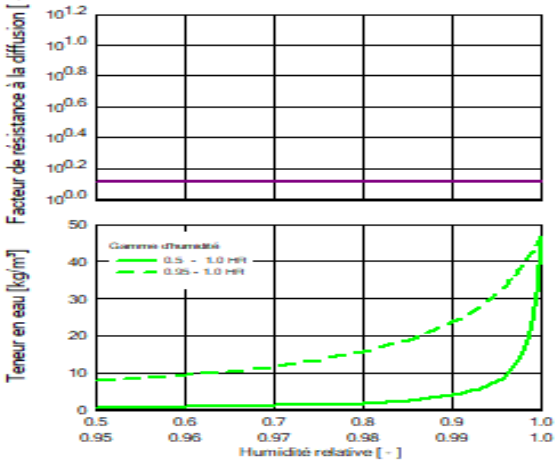




Matériaux: Laine de verre

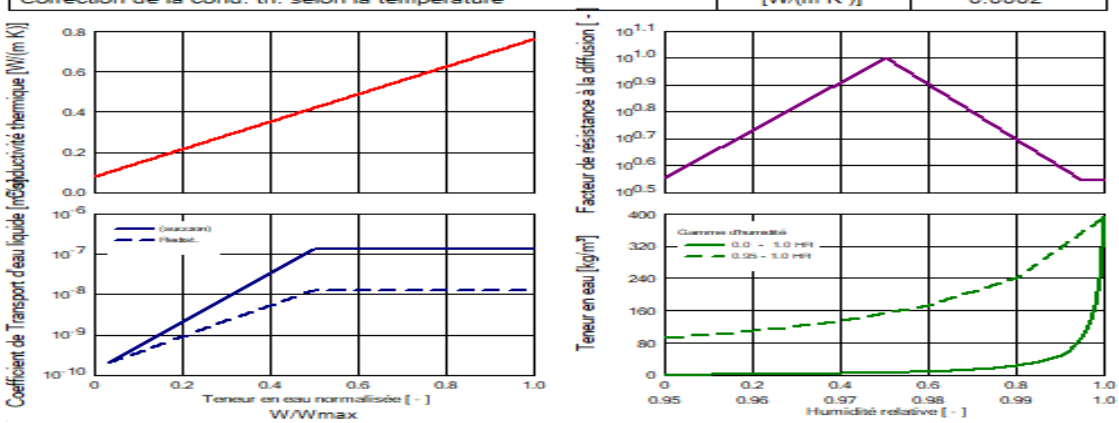
Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	30
Porosité	[m³/m³]	0.99
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	840
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.035
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	1.3
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002





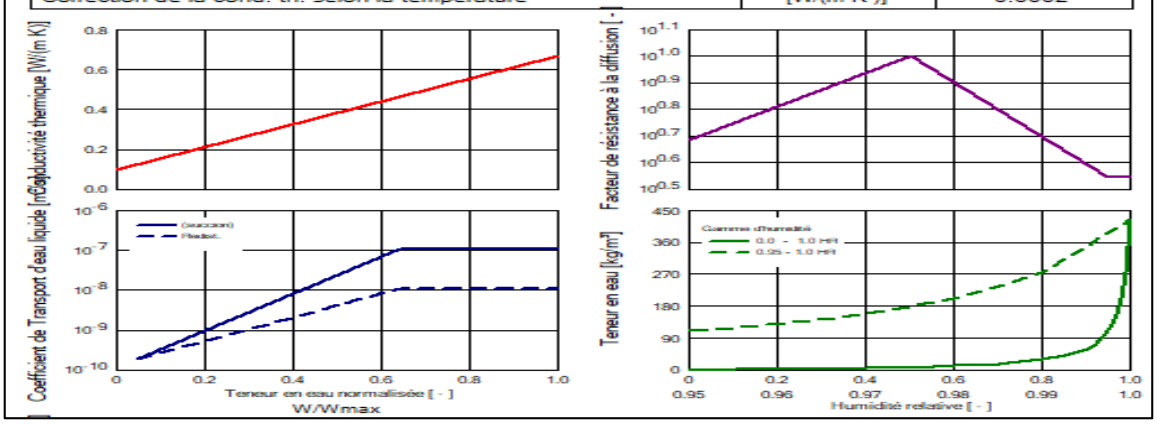
Matériaux: Béton de Chanvre HLC2

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	317
Porosité	[m³/m³]	0.79
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1000
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.082
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	3.6
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m³]	23.77
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m³]	393.08
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m² s^0.5)]	0.074
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de l'humic	[%/M.-%]	3.34
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



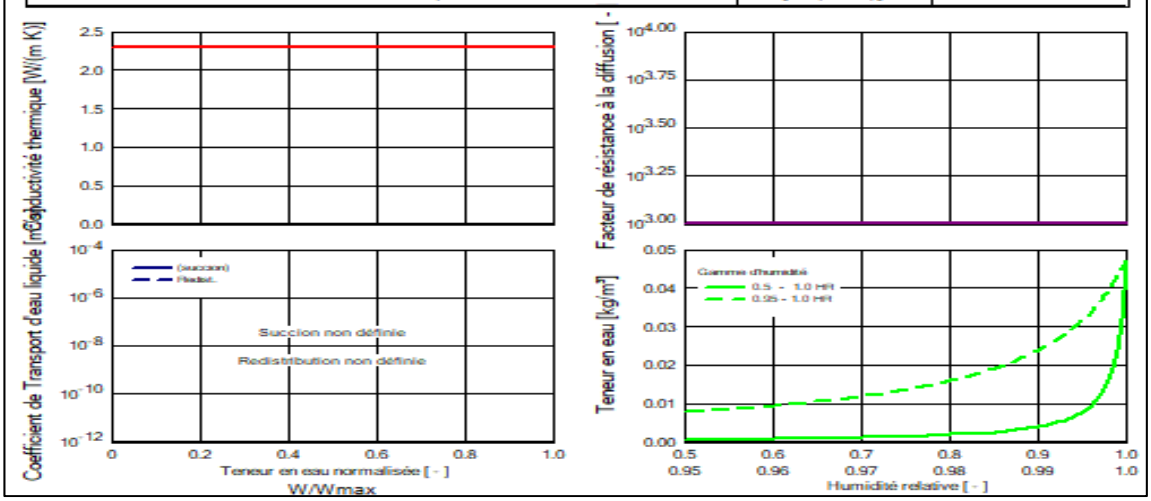
Matériaux: Béton de Chanvre

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	388
Porosité	[m³/m³]	0.66
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1560
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.1
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	4.85
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m³]	29
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m³]	424
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m² s^0.5)]	0.074
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de l'humic	[%/M.-%]	3.34
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



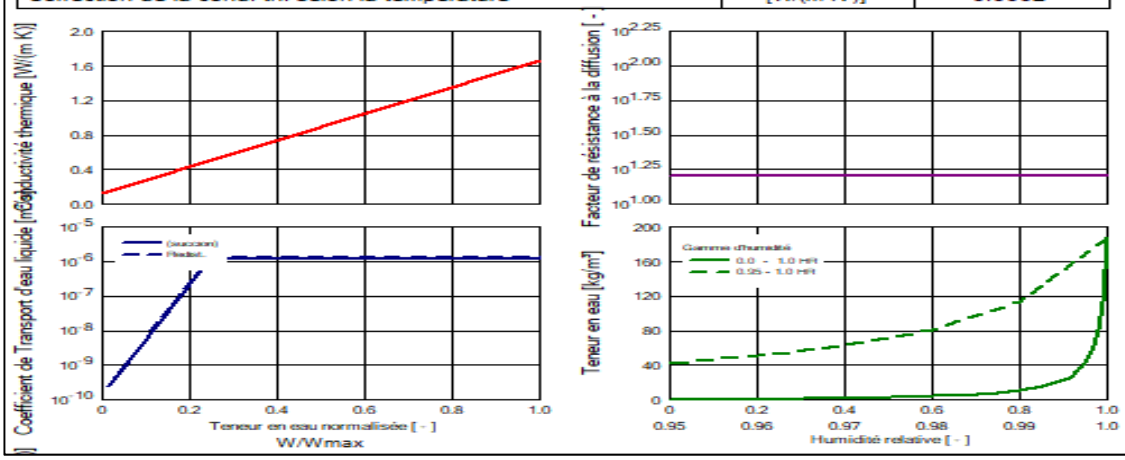
Matériaux: Freine vapeur (sd=1m)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	130
Porosité	[m³/m³]	0.001
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2300
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	2.3
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	1000
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



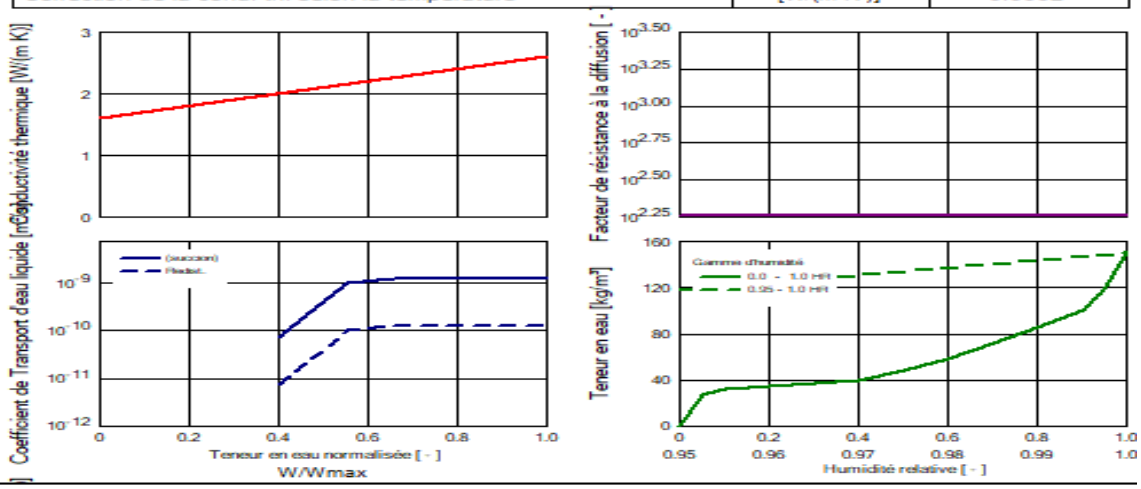
Matériaux: Bloc terre cuite alvéolé (Masse vol. 650 kg/m3)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	600
Porosité	[m³/m³]	0.77
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	850
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.12
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	16
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m³]	11
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m³]	188
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de l'humic	[%/M.-%]	10
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



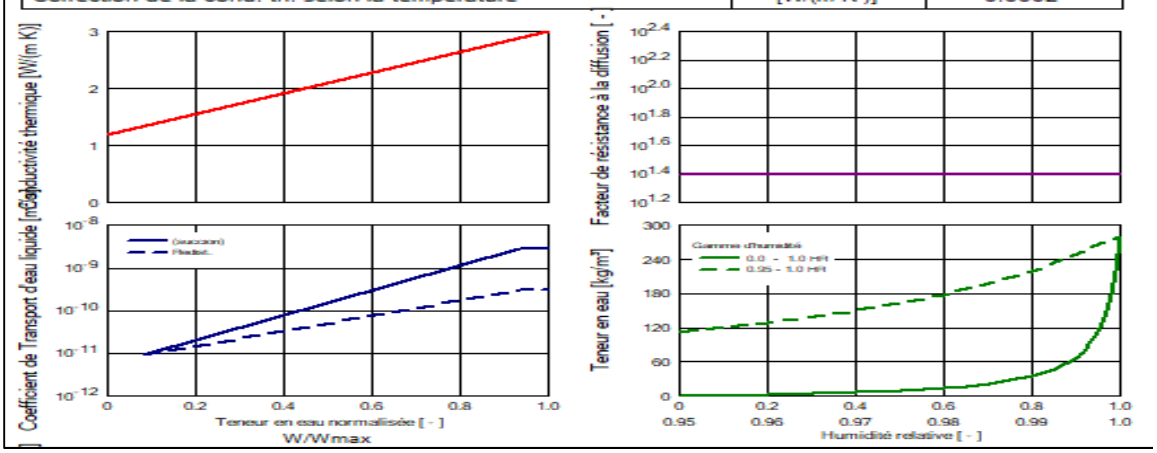
Matériaux: Béton E/C=0.5

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	2300
Porosité	[m³/m³]	0.18
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	850
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	1.6
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	180
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de l'humic	[%/M.-%]	8
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



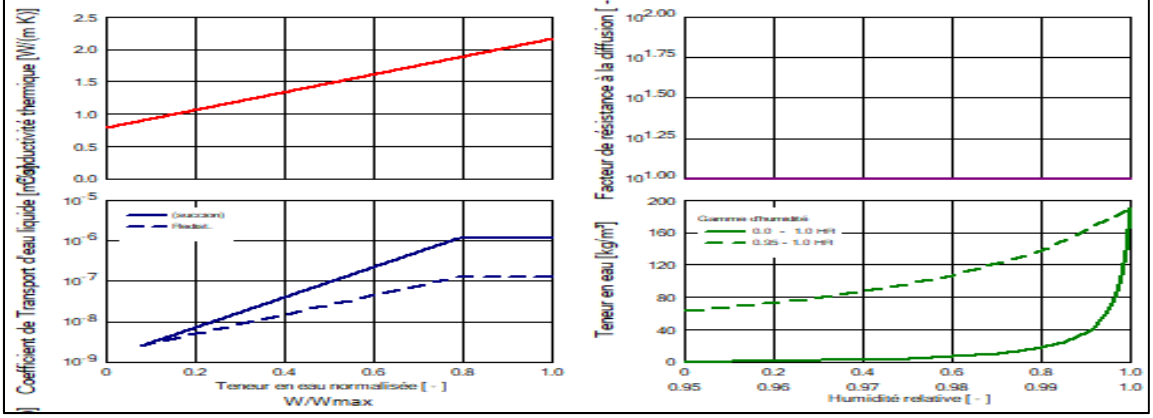
Matériaux: Enduit au ciment (valeur A: 0.51 kg/m2h0.5)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	2000
Porosité	[m³/m³]	0.3
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	850
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	1.2
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	25
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m³]	35
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m³]	280
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de l'humic	[%/M.-%]	10
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



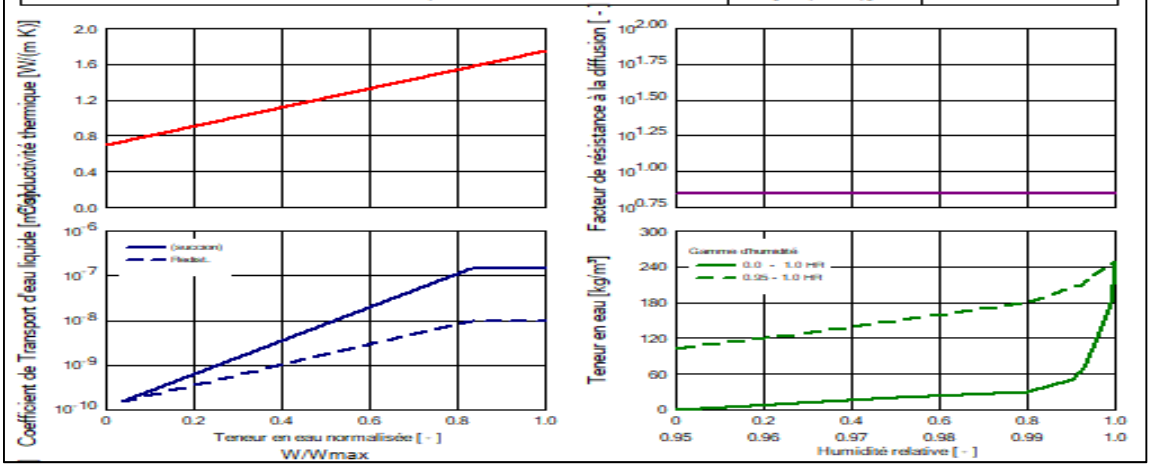
Matériaux: *Maçonnerie en brique - Ouvert

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	2100
Porosité	[m³/m³]	0.24
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1732
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.8
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	10
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m³]	18
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m³]	190
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m² s^0.5)]	0.11
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de l'humic	[%/M.-%]	15
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



Matériaux: Enduit à la chaux (valeur A: 3.0 kg/m2h0.5)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m³]	1600
Porosité	[m³/m³]	0.3
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	850
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.7
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	7
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de l'humic	[%/M.-%]	8
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K²)]	0.0002



Après avoir faire rentrer toutes les données et choisir toutes les conditions aux limites, nous pouvons maintenant faire sortir des profils de température extérieure et intérieure.

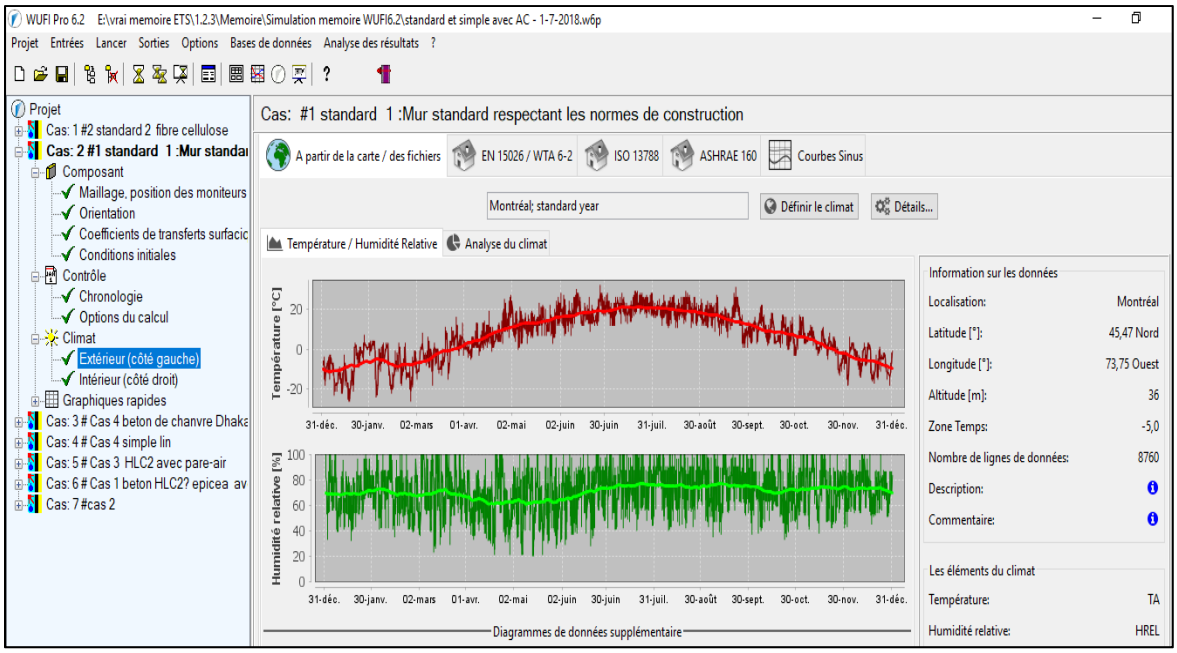


Figure-A II-13 Profil de température et du taux d'humidité extérieur de la ville de Montréal analysés par WUFI Pro 6.2

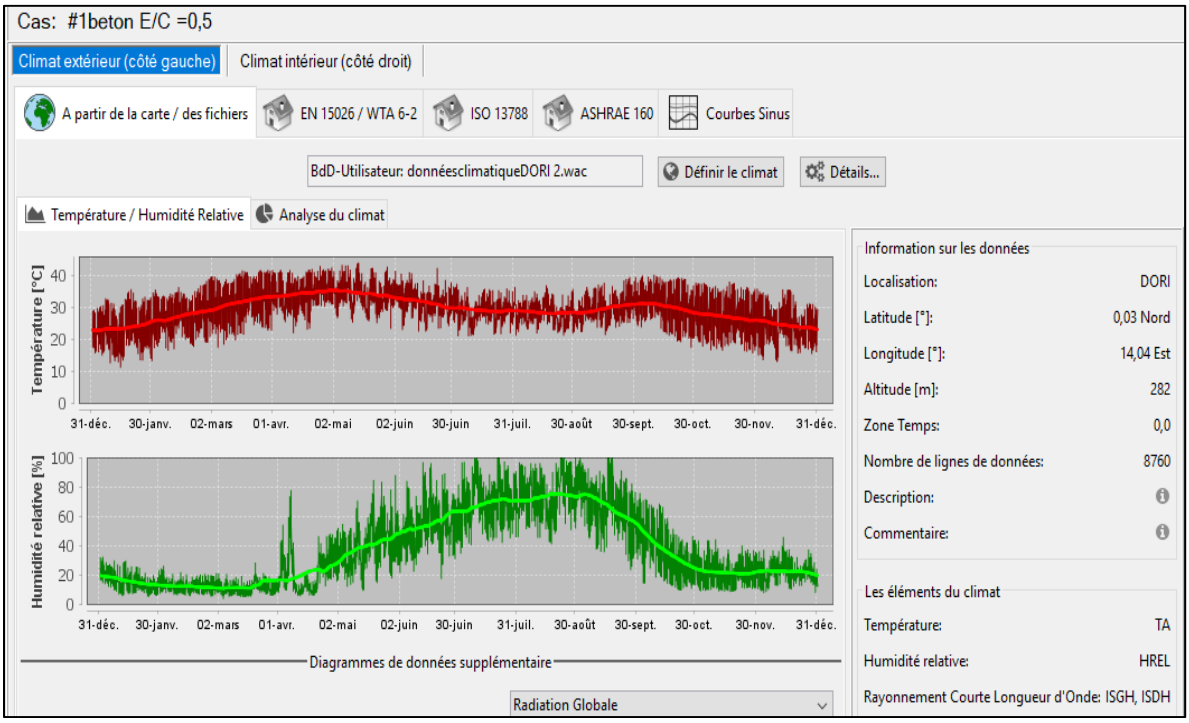


Figure-A II-14 Profil de température et du taux d'humidité extérieur de la ville de Dori analysés par WUFI Pro 6.2

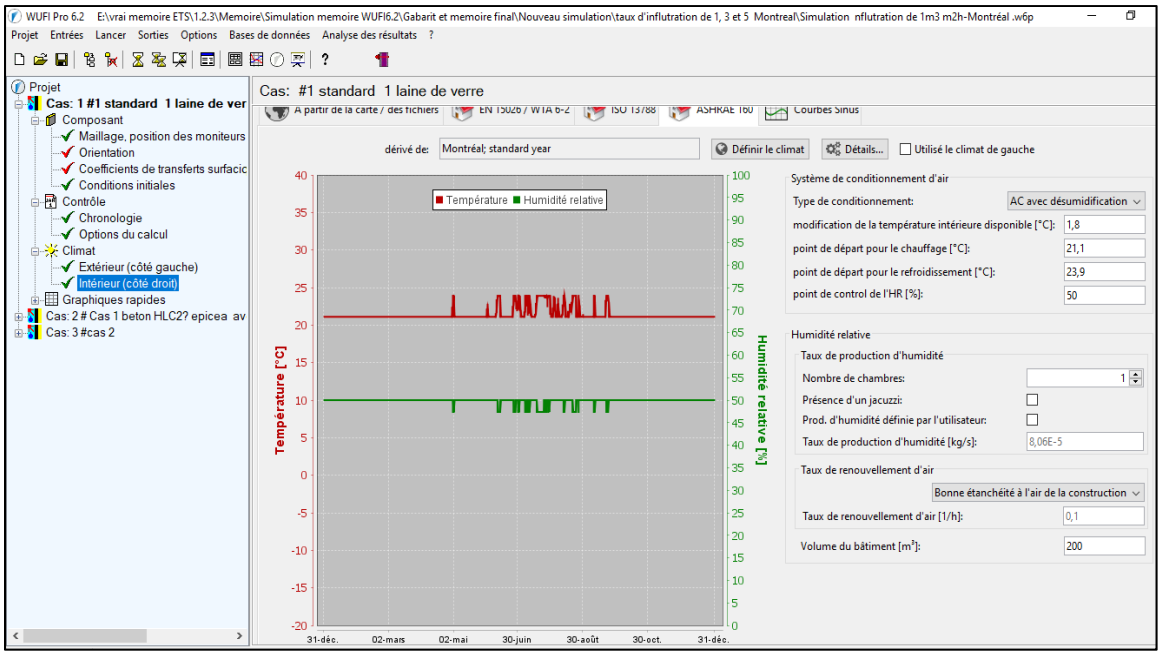


Figure-A II-15 Profil de température et du taux d'humidité intérieur de la ville de Montréal

Figure-A II-16 Profil de température et du taux d'humidité intérieur de la ville de Dori

II.3. WUFI Pro 6.2_Résultats des murs de Montréal et des murs de Dori

II.3.1 Résultats pour des taux d'infiltration d'eau de 15m^3/m2 h et de 20 m^3/m^{2}h pour la ville de Montréal

Tableau-A II-1 Résumé du calcul cas standard : un taux d'infiltration d'eau de 15m^3/m^2 h

Statut du calcul

Date et heure du calcul	03/09/2019 13:15:00
Durée du calcul	2 min.22 sec.
Début/fin de calcul	01/01/2014 / 01/01/2017
Nb. d'erreurs de convergence	0

Vérification de la qualité numérique

Intégrale des flux, côté gauche (kl, dl)	[kg/m²]	12,87 -16,87
Intégrale des flux, côté droit (kr, dr)	[kg/m²]	0,0 -0,86
Balance 1	[kg/m²]	0,21
Balance 2	[kg/m²]	0,2

Teneur en eau [kg/m³]

	Début	Fin	Min.	Max.
Teneur en eau totale	1,5	1,71	0,84	2,96

Teneur en eau [kg/m³]

Couche/Matériaux	Début	Fin	Min.	Max.
Epicéa	55,83	65,61	33,65	115,05
Lame d'air 20 mm	1,88	3,41	0,93	4,57
Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,00	0,00	0,00	0,01
Isolation en polystyrène expansé	0,12	1,53	0,05	4,22
Laine de verre	1,86	2,07	0,67	3,96
Freine vapeur (sd=1m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Lame d'air 20 mm	1,88	0,54	0,42	1,88
Plaque de plâtre (intérieur)	8,65	4,44	4,02	8,65

Intégrale des flux par rapport au temps

Flux de chaleur, côté gauche	[MJ/m²]	-1733,89
Flux de chaleur, côté droit	[MJ/m²]	-272,05
Flux d'humidité, côté gauche	[kg/m²]	-10,06
Flux d'humidité, côté droit	[kg/m²]	-0,86

Sources hygrothermiques

Sources de chaleur	[MJ/m²]	0,0

Sources d'humidité	[kg/m²]	3,345
Sources d'humidité non injectée (limitation de la source)	[kg/m²]	0,0
Source1 (Source d'humidité; Modèle d'infiltration d'air IBP)	[kg/m²]	3,345

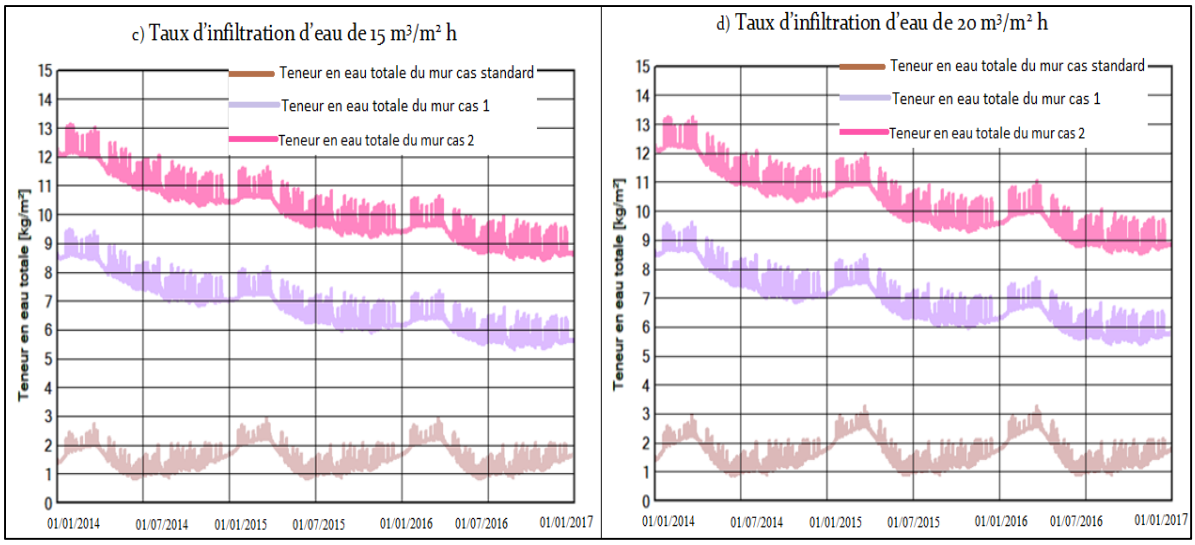


Figure-A II-17 Teneur en eau totale des murs cas standard, mur 1 et mur 2 à Montréal

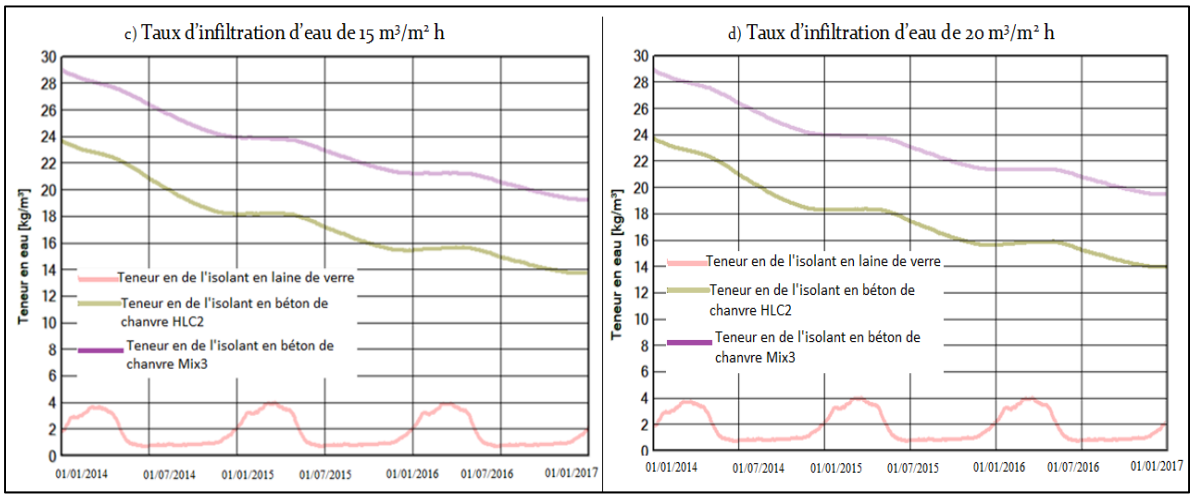


Figure-A II-18 Teneur en eau des bétons chanvre et la laine de verre

Les figures-A II-17 et A II-18 montrent que pour les taux d'infiltration de plus de 15m^3/m^2 h ont une légère influence sur la teneur en eaux totale des murs et sur la teneur en eau des isolants en laine de verre et bétons de chanvre.

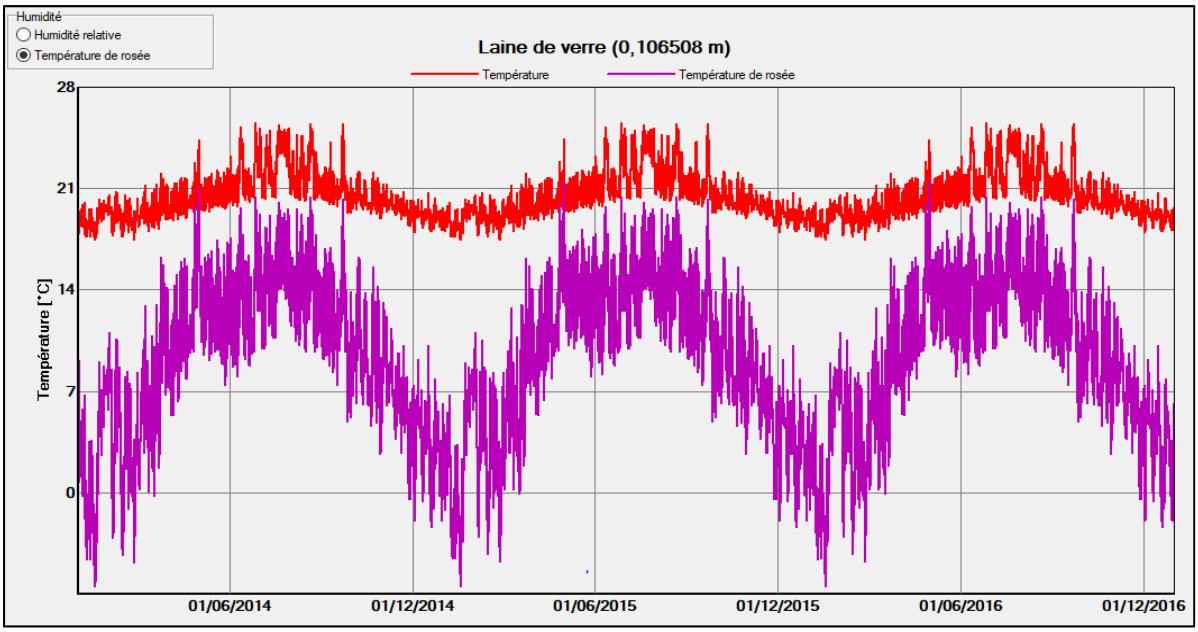


Figure-A II-19 Risque de condensation sur la surface intérieure de la laine de verre pour un taux d'infiltration de 15 m^3/m^2h

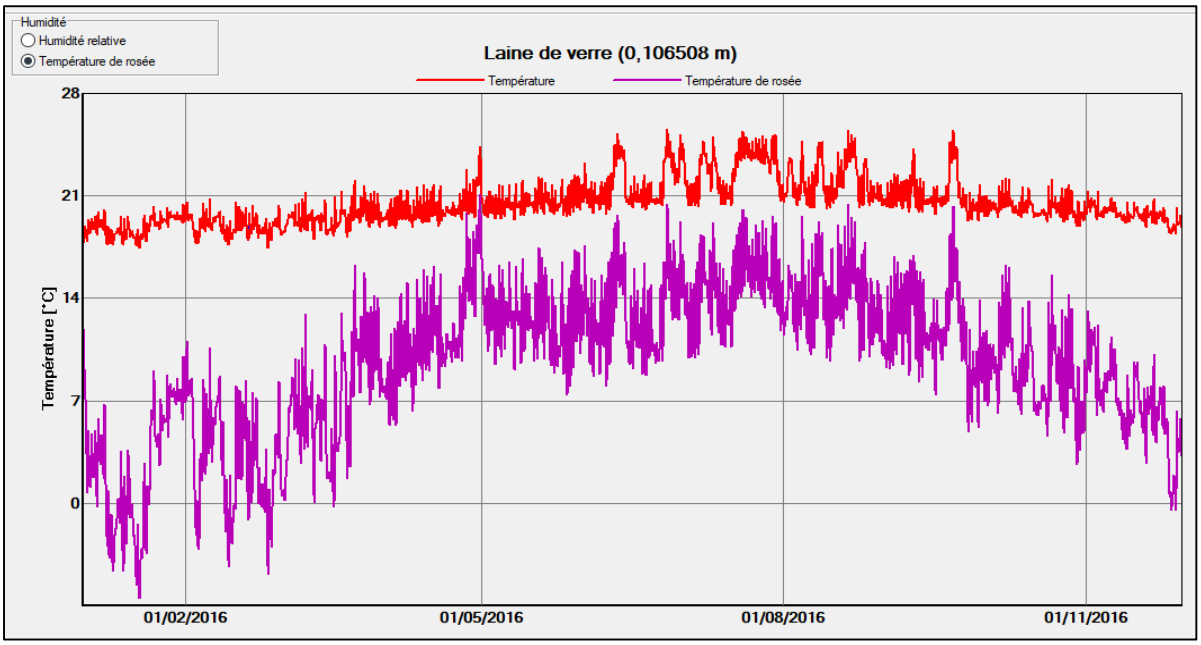


Figure-A II-20 Risque de condensation sur la surface intérieure de la laine de verre : 1ans un taux d'infiltration de 15 m^3/m^2h

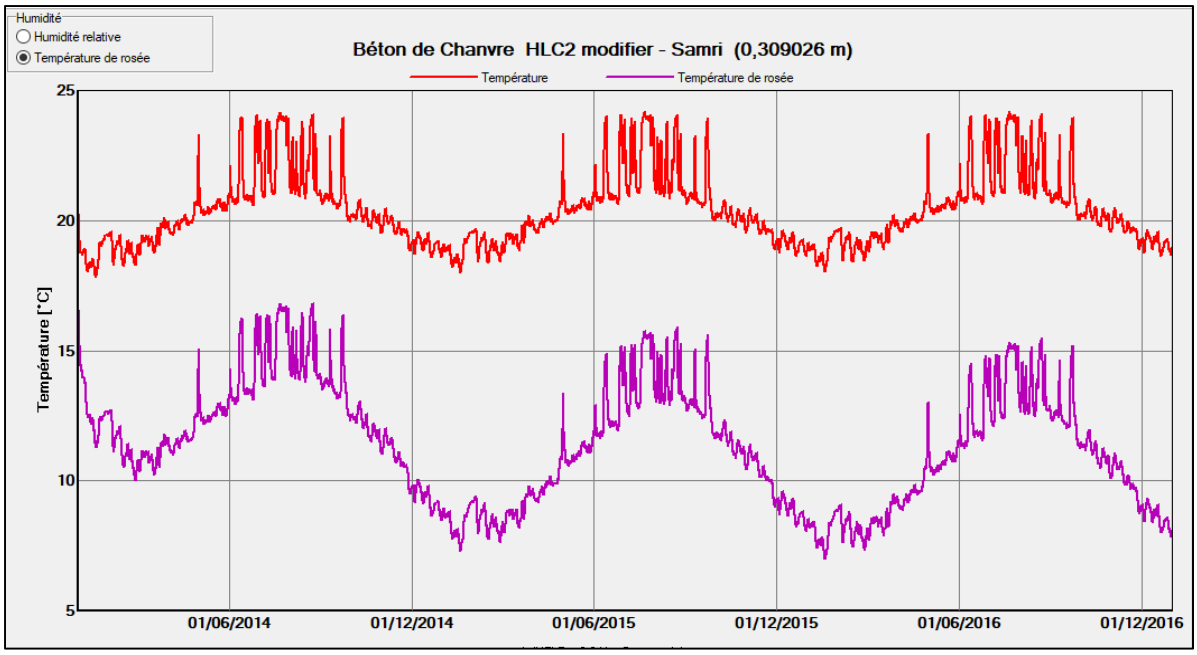


Figure-A II-21 Risque de condensation sur la surface intérieure du béton de chanvre HLC2 pour un taux d'infiltration de 15m^3/m^{2}h

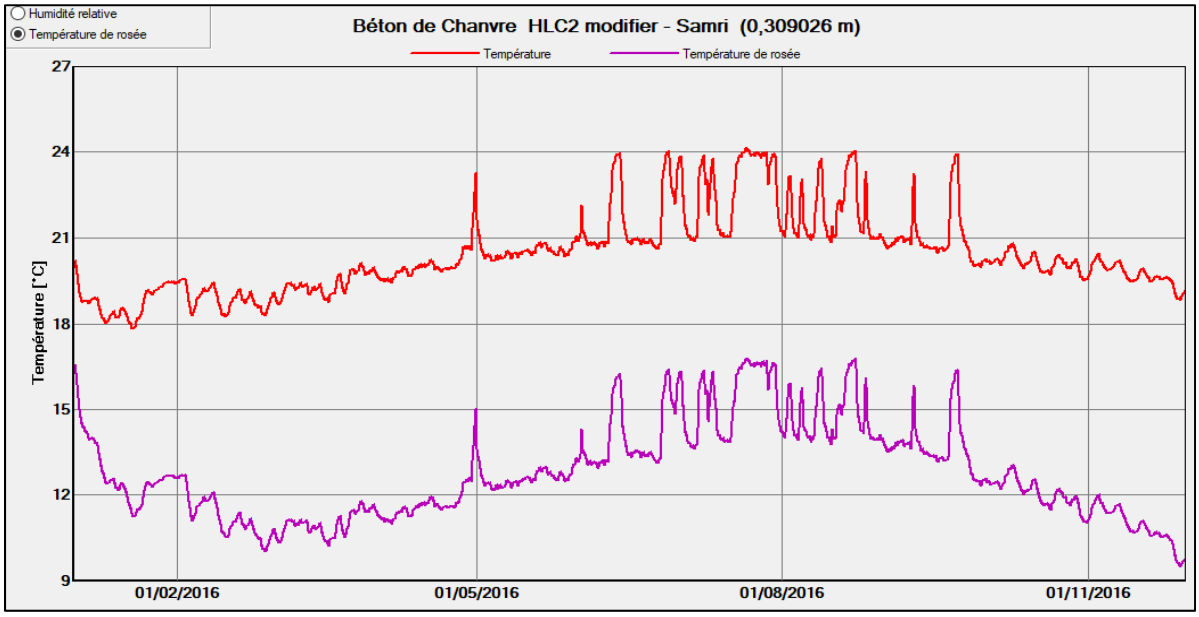


Figure-A II-22 Risque de condensation sur la surface intérieure du béton de chanvre HLC2 : 1ans un taux d'infiltration de 15 m^3/m^{2}h

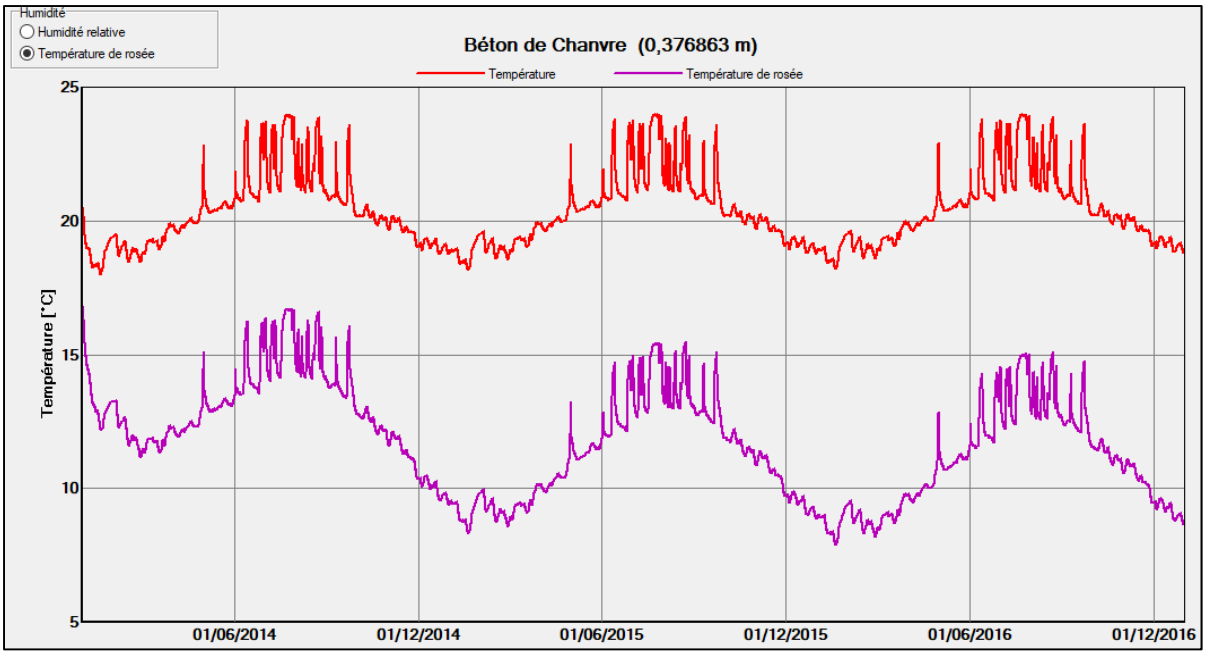


Figure-A II-23 Risque de condensation sur la surface intérieure du béton de chanvre Mix3 pour un taux d'infiltration de 15m^3/m^{2}h

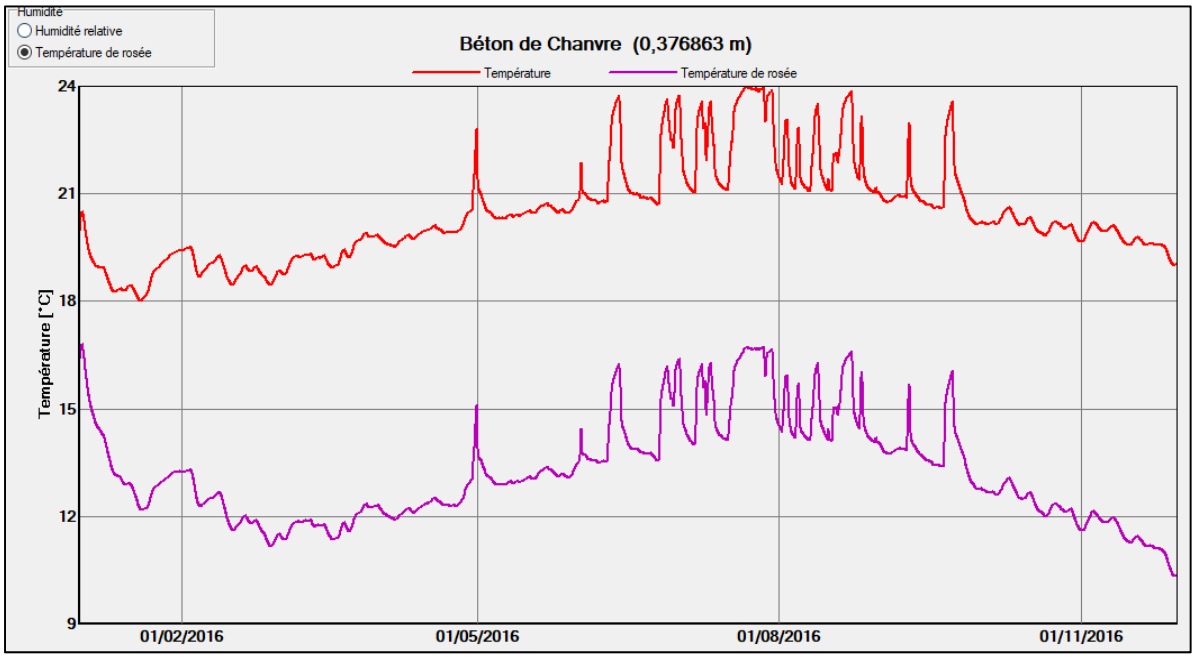


Figure-A II-24 Risque de condensation sur la surface intérieure du béton de chanvre Mix : 1ans un taux d'infiltration de 15 m^3/m^{2}h

Les figures-A II-19, A II-20, A II-21, A II-22, A II-23 montrent qu'il n'y pas de risque de condensation à l'intérieur des deux bétons de chanvre. Cependant, le mur en laine de verre présente un risque de condensation à l'intérieur du mur pour une durée très courte.

II.3. 2 Résultats pour les murs la ville de Dori

Tableau-A II-2 Résumé du calcul cas 1 : bloc de ciment

Statut du calcul

Date et heure du calcul	02/08/2019 09:24:03
Durée du calcul	1 min,5 sec.
Début/fin de calcul	01/01/2014 / 01/01/2017
Nb. d'erreurs de convergence	0

Vérification de la qualité numérique

Intégrale des flux, côté gauche (kl, dl)	[kg/m²]	28,23 -27,57
Intégrale des flux, côté droit (kr, dr)	[kg/m²]	0,0 6,26
Balance 1	[kg/m²]	-5,59
Balance 2	[kg/m²]	-5,59

Intégrale des flux par rapport au temps

Flux de chaleur, côté gauche	[MJ/m²]	-673,72
Flux de chaleur, côté droit	[MJ/m²]	267,74
Flux d'humidité, côté gauche	[kg/m²]	0,64
Flux d'humidité, côté droit	[kg/m²]	6,27

Sources hygrothermiques

Sources de chaleur	[MJ/m²]	3407,22
Source1 (Source de chaleur)	[MJ/m²]	1703,61
Source1 (Source de chaleur)	[MJ/m²]	1703,61
Sources d'humidité	[kg/m²]	0,0

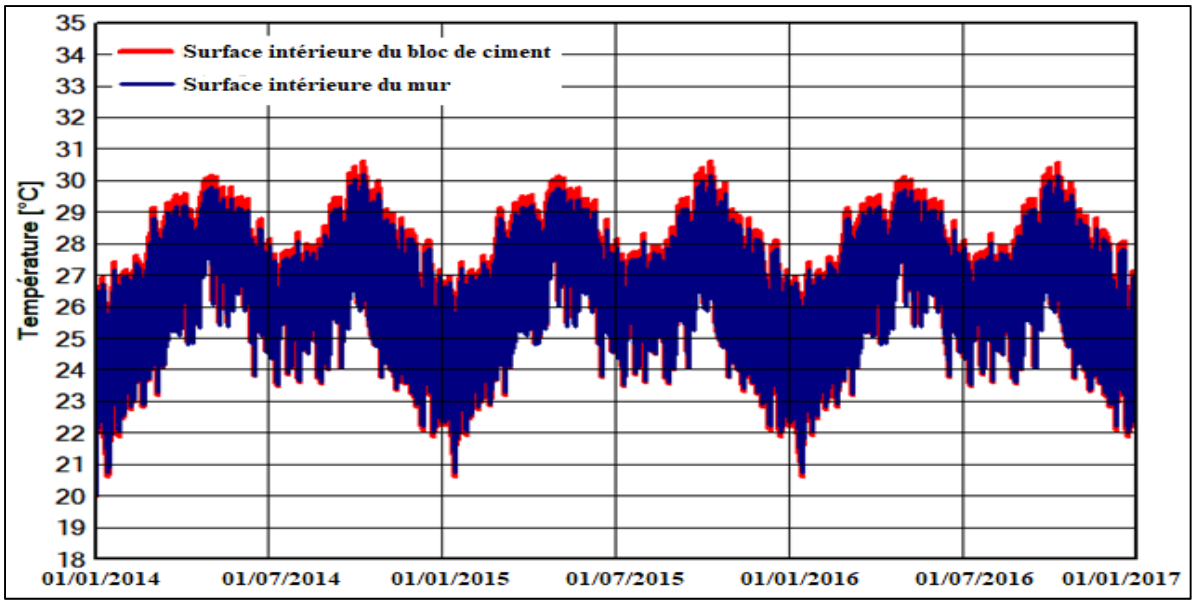


Figure-A II-25 Évolution de la température intérieure du mur en bloc de ciment pour un taux de rayonnement solaire incident de 20%

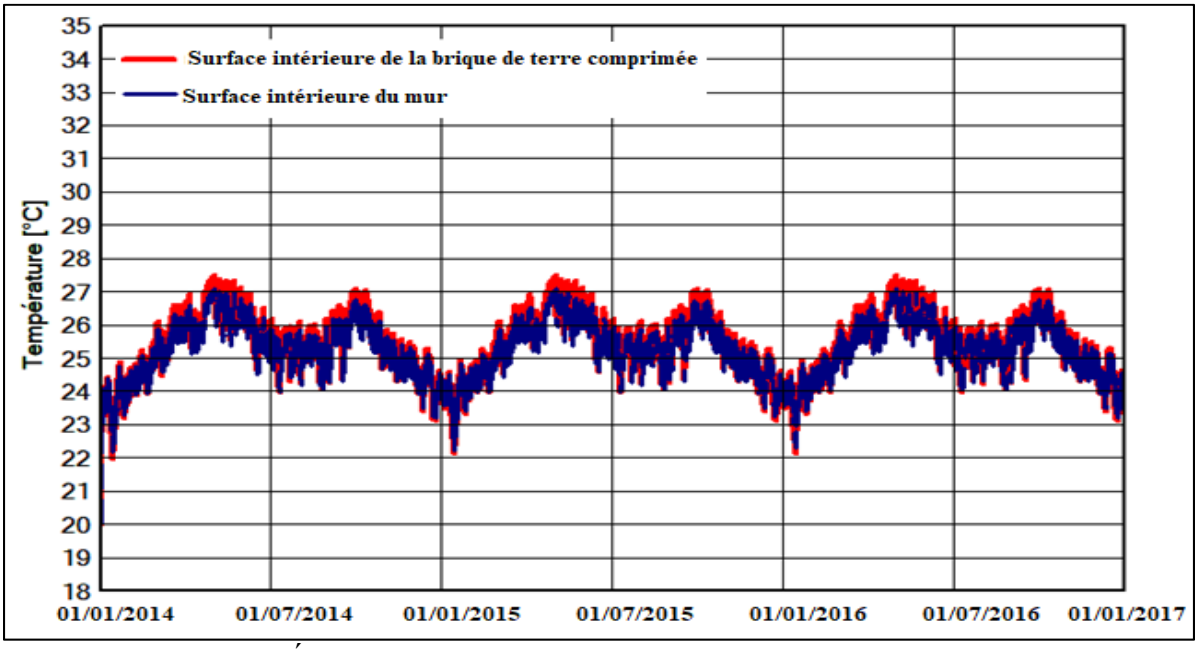


Figure-A II-26 Évolution de la température intérieure du mur en brique de terre comprimée pour un taux de rayonnement solaire incident de 20%

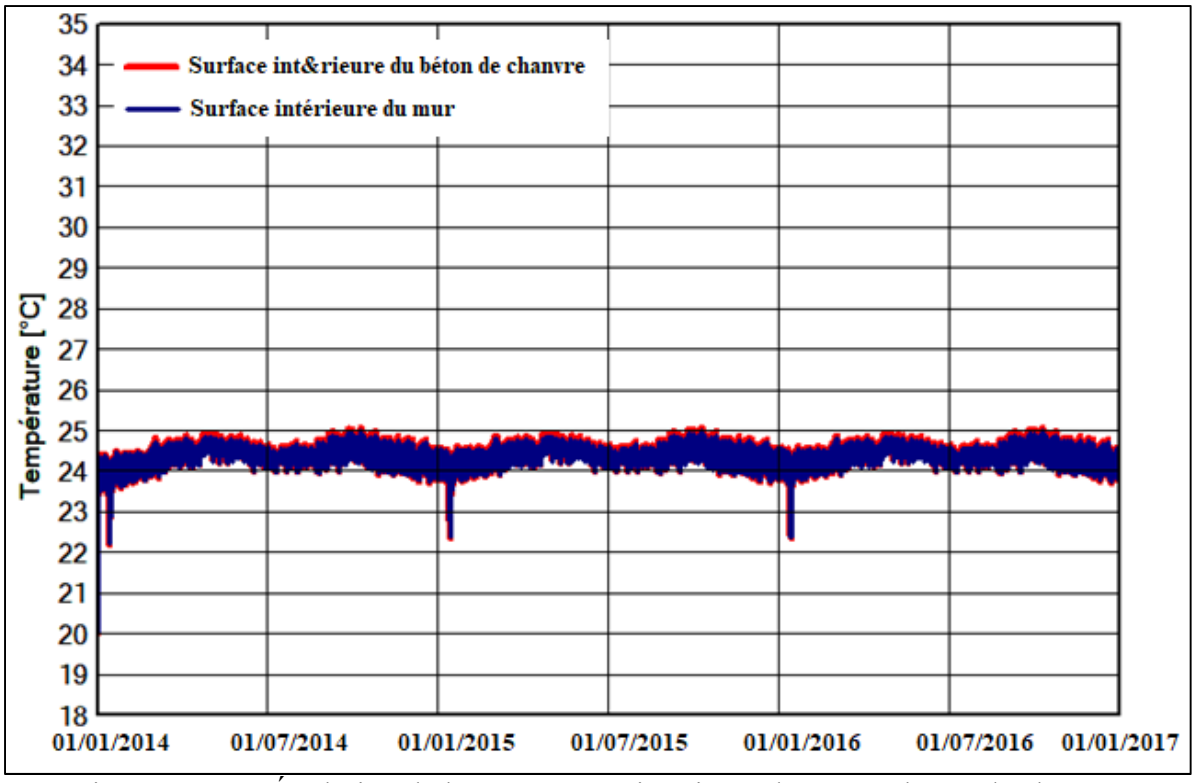


Figure-A II-27 Évolution de la température intérieure du mur en béton de chanvre pour un taux de rayonnement solaire incident de 20%

Les figures A II-25, A II-26 et A II-27 montrent que les murs en béton de chanvre est un matériau très performant en termes de régularisation de la température interne. Cependant la brique de terre comprimée, elle est plus performante thermiquement que le bloc de ciment.

II.3. 3 Distribution des isoplèthes de moisissure, Flux de chaleur, Transmission thermique et Profil de température

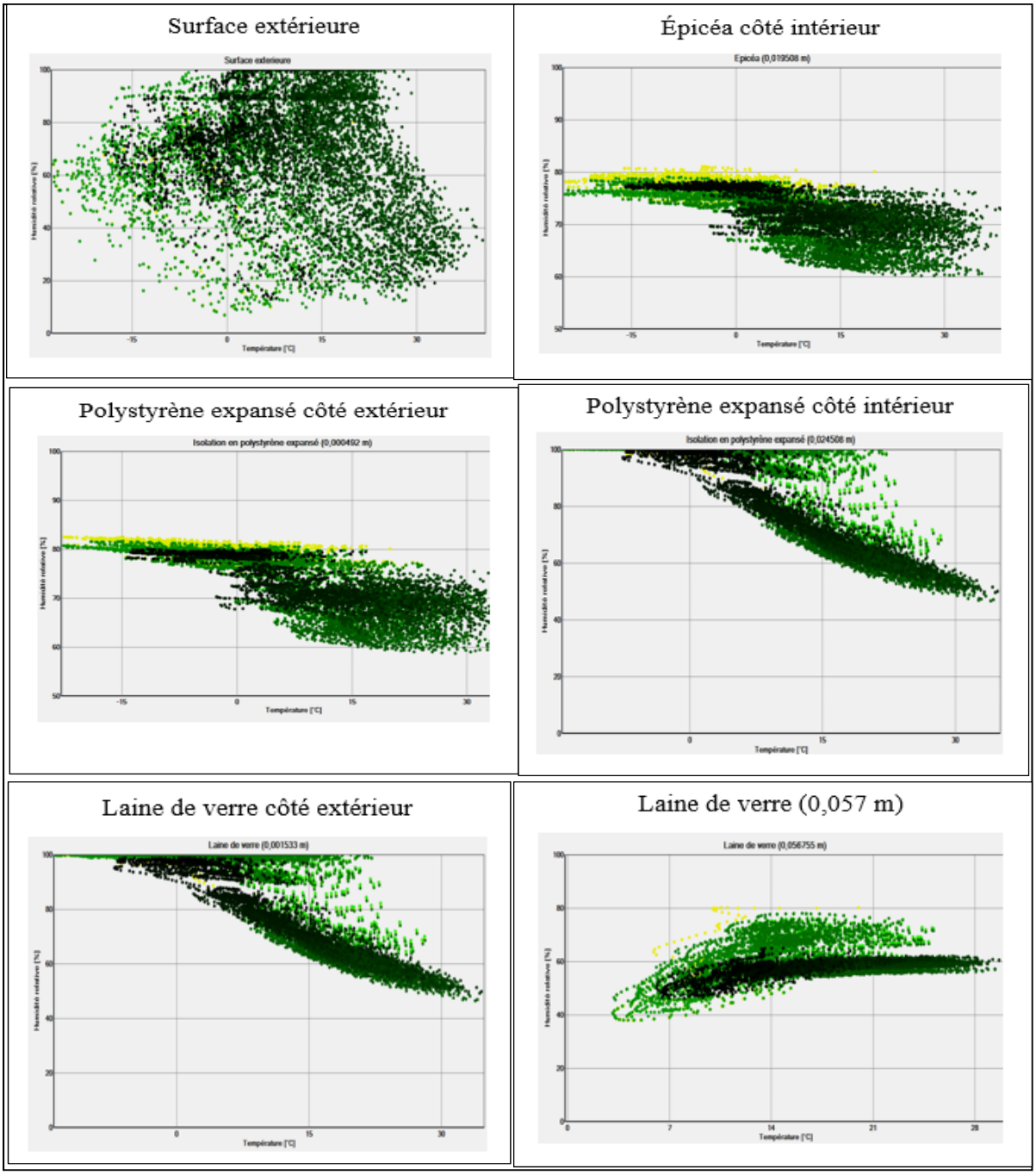


Figure-A II-28 Distribution des isoplèthes de moisissure, mur en laine de verre

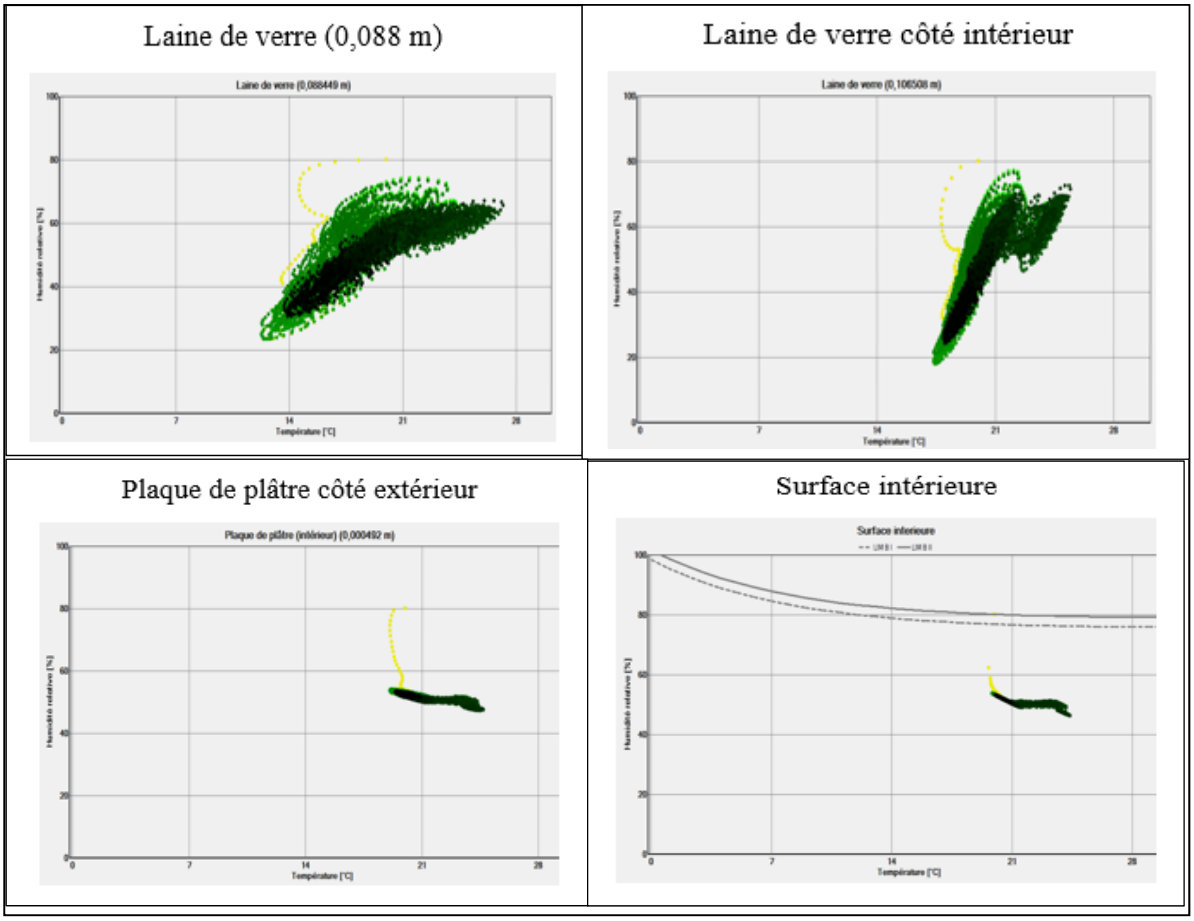


Figure-A II-28 suite

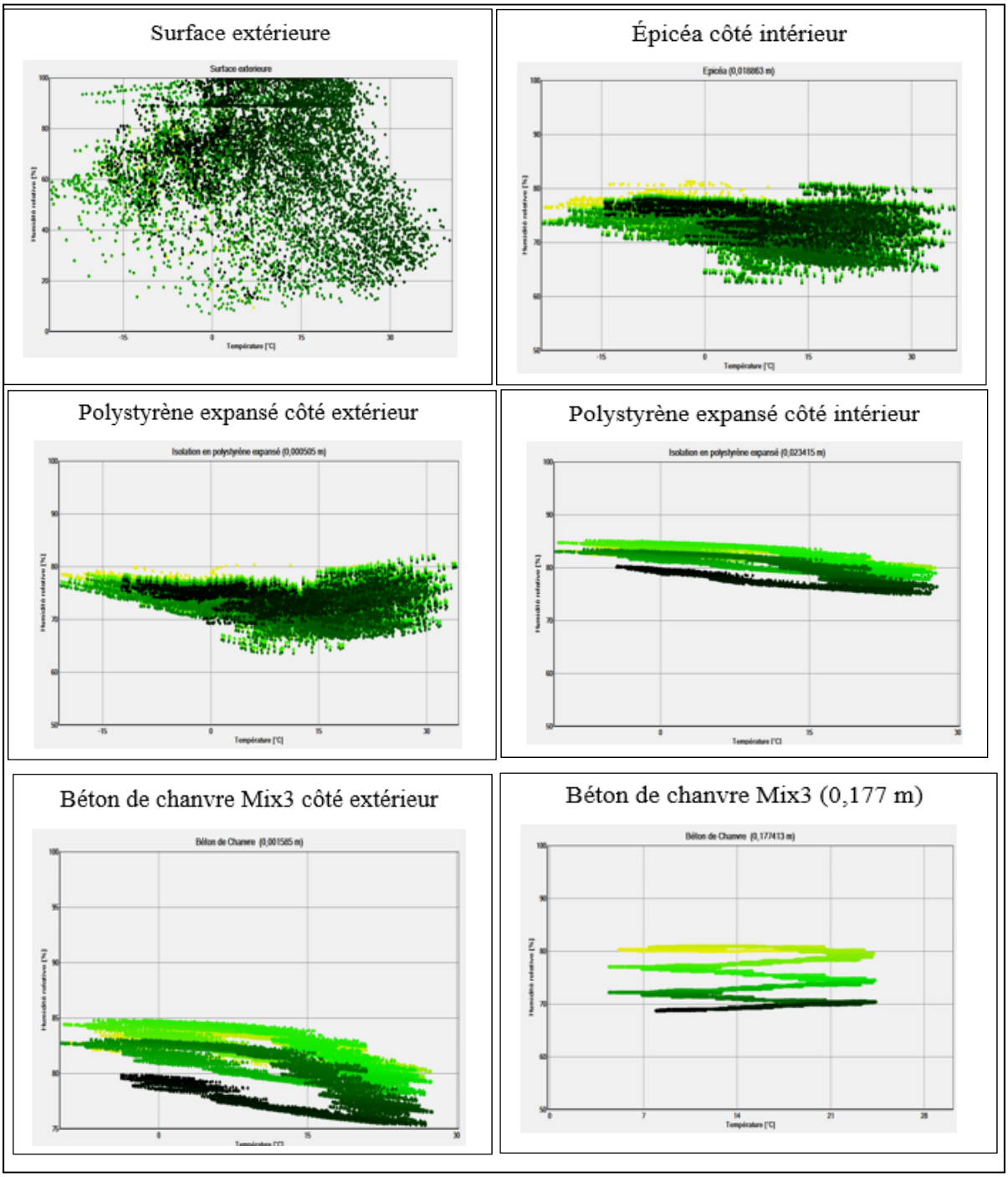


Figure-A II-29 Distribution des isoplèthes de moisissure, mur en béton de chanvre Mix 3

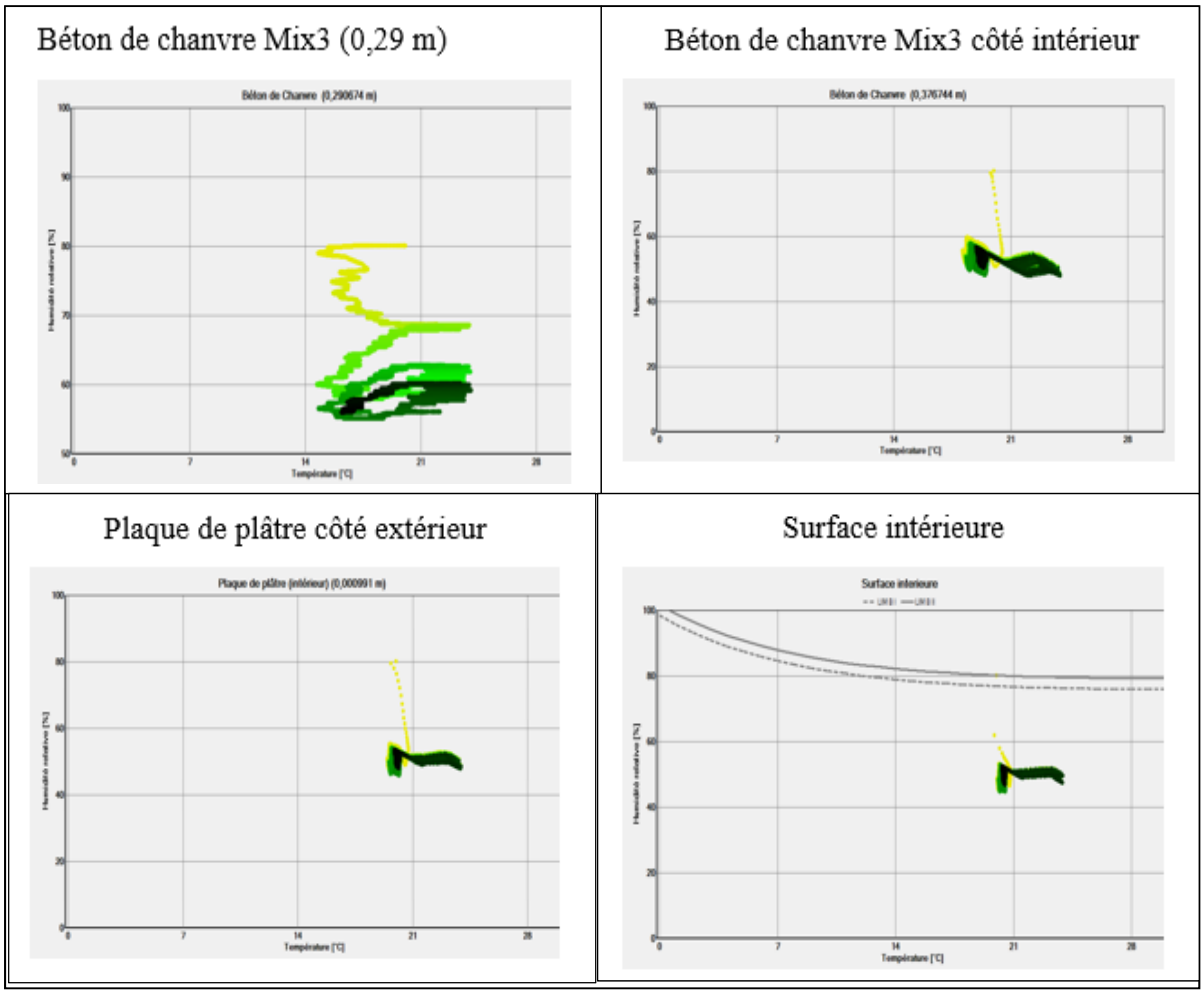


Figure-A II-29 suite

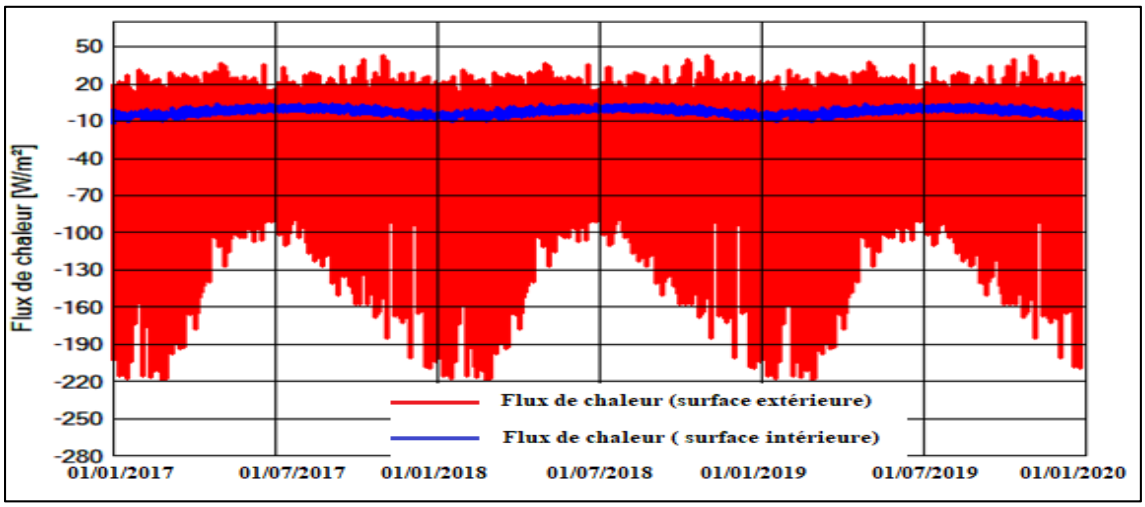


Figure-A II-30 Flux de chaleur du mur Cas standard

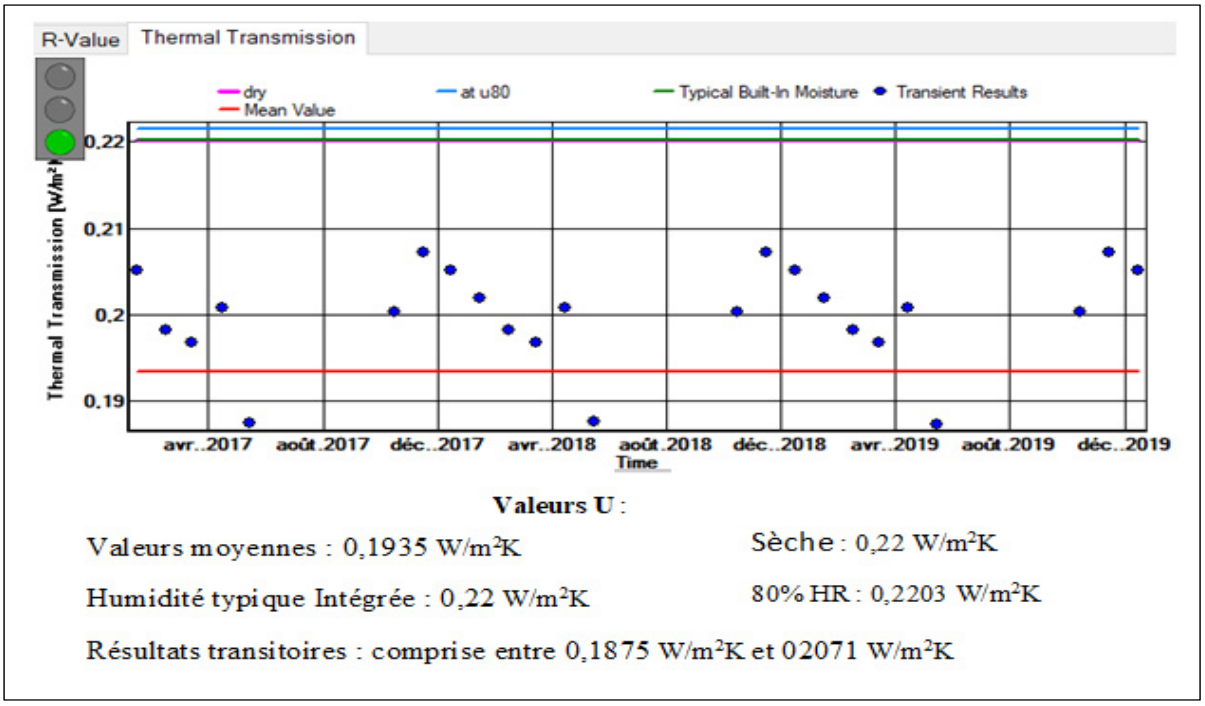


Figure-A II-31 Transmission thermique du mur Cas standard

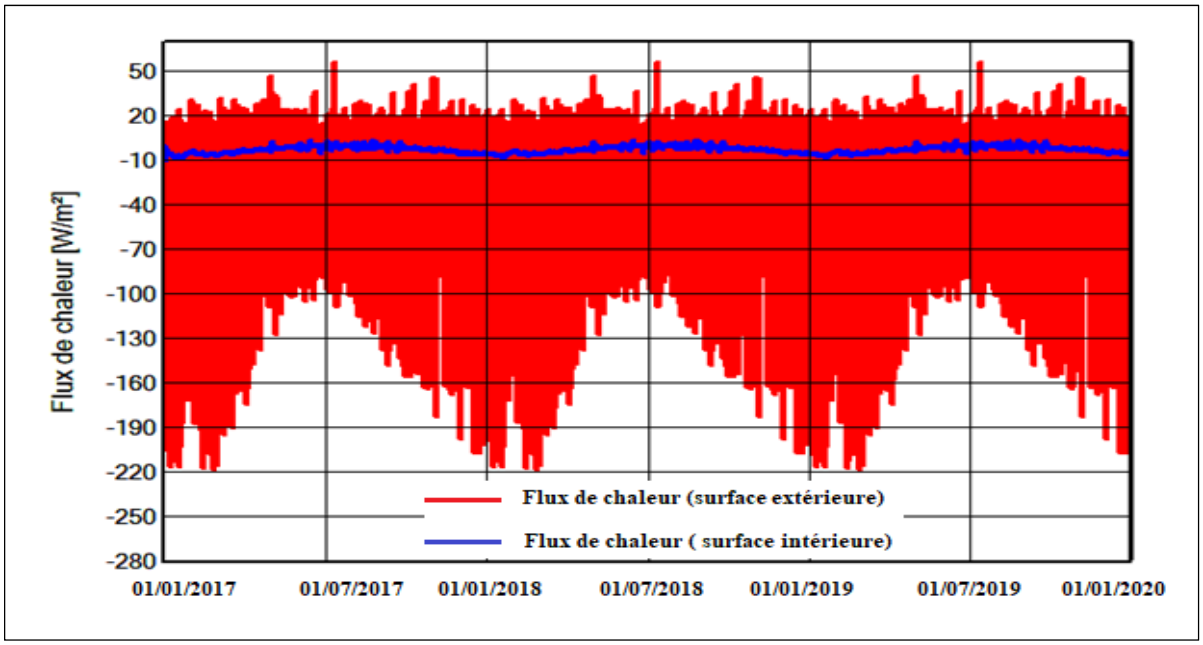


Figure-A II-32 Flux de chaleur du mur Cas 2

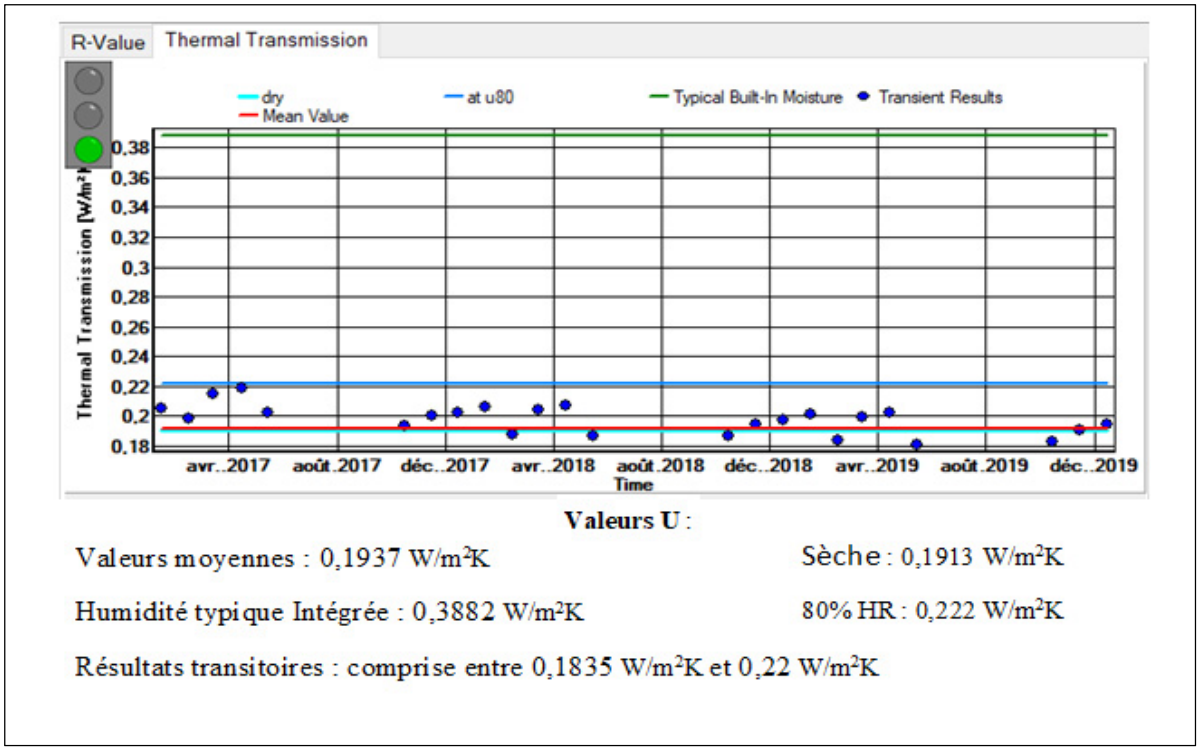


Figure-A II-33 Transmission thermique du mur Cas 2

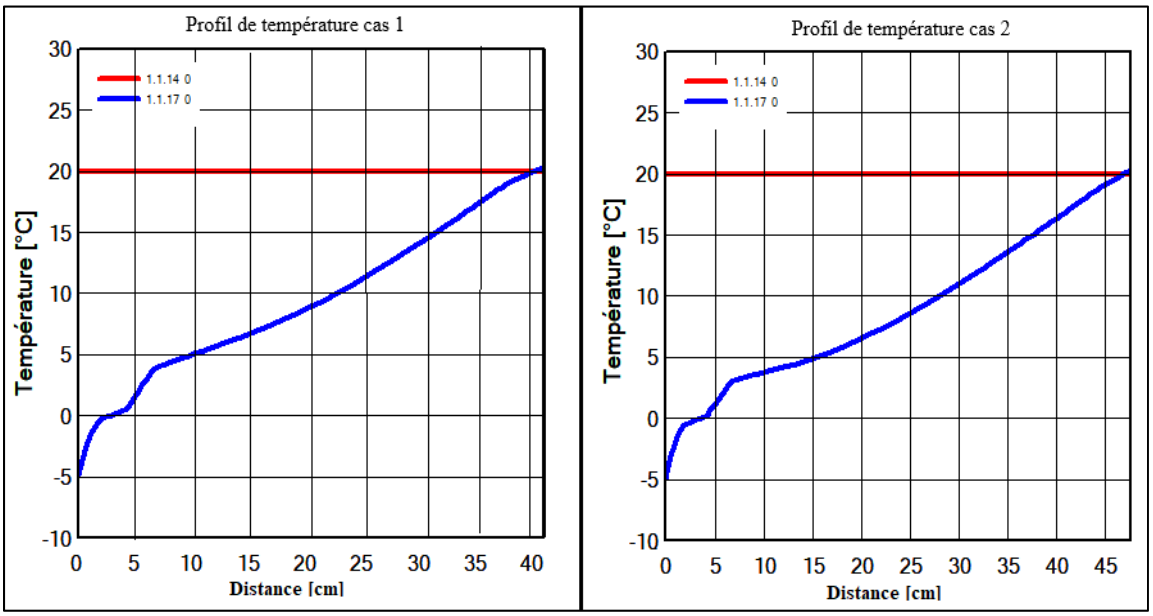


Figure-A II-34 Profil de température des murs cas 1 et cas 2

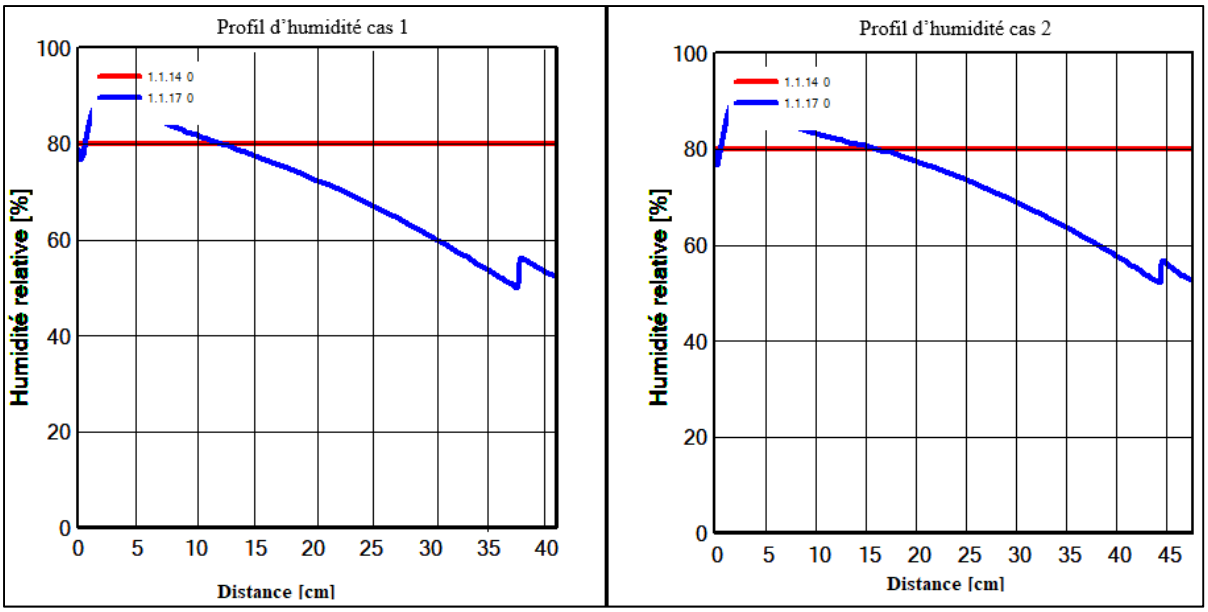


Figure-A II-35 Profil d'humidité des murs cas 1 et cas 2

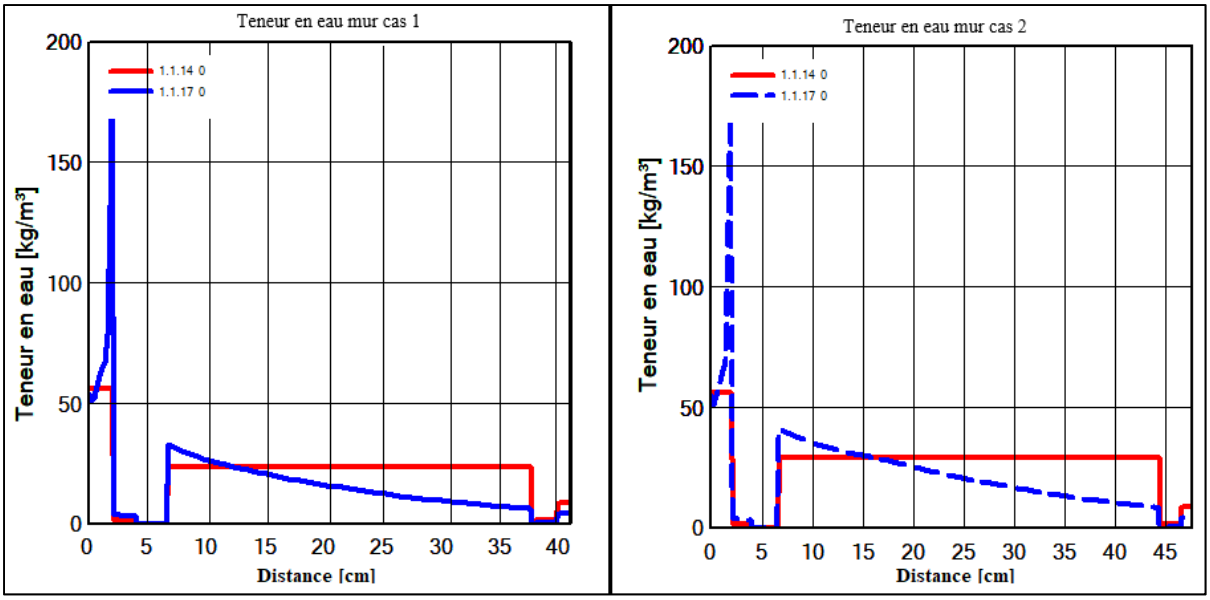


Figure-A II-36 Profil de teneur en eau des murs cas 1 et cas 2

BIBLIOGRAPHIE

Abelé, C. (2009). Transfert d'humidité à travers les parois : Évaluer les risques de condensation. CSTB: le futur en construction, 74 p.

Abderrahman Nouda. (1992). Matériaux de construction traditionnels : Un bilan des recherches et des expériences. Edition N°:35.

ADEME, Bourgogne, C. R., Alsace, C. R., Franche-Comité, C. R., & Loire, C. R. P. d. l. (2012). L'étanchéité à l'air des bâtiments. Wigwam, 50.

Alev, U., Uus, A., Teder, M., Miljan, M. J., & Kalamees, T. (2014). Air leakage and hygrothermal performance of an internal insulated log house. the 10th Nordic Symposium on Building Physics, Lund, Sweden.

Arena , L. B., Owens, D., & Mantha, P. (2013). Measured performance of an r-40 double-stud wall in climate zone 5a", in: Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference, Clearwater Beach, FL, USA.

ANSI/ASHRAE. (2016). Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. ASHRAE Atlanta, GA. Repéré à https://www.techstreet.com/standards/ashrae-160-2016?product_id=1939166

Antretter, F., Klingenberg, K., & Pazold, M. (2013). All-in-One Design Tool Solution for Passive Houses and Buildings—Monthly Energy Balance and Hygrothermal Simulation—Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII international conference Cleawater. 2013 ASHRAE, 15p.

ARPE, A., ADEME. (2012). LES MATÉRIAUX BIO-SOURCÉS PRODUITS ET/ OU UTILISÉS EN BASSE-NORMANDIE. 100 p.

Barclay, M., Holcroft, N., & Shea, A. (2014). Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp–lime buildings. Building and Environment, 80, 204-212.

BATIONO, A. F. (2015). Burkina Faso : 04 cimenteries pour 2,5 millions de tonnes de ciment par an. Ecodufaso/Groupe Ecodafrik, 21 octobre 2015. Repéré à http://ecodufaso.com/burkina-faso-04-cimenteries-pour-25-millions-de-tonnes-de-ciment-par-an/

Bayol, D. (2016). Eco-construction -Bioclimatique - le béton de chanvre vous permet un bonus pour construire plus. Repéré à http://db-chanvre.com/la-construction-passive/

Belleudy, C., Kayello, A., Woloszyn, M., & Ge, H. (2015). Experimental and numerical investigations of the effects of air leakage on temperature and moisture fields in porous insulation. *Building and Environment*, pp.94(92), 457-466.

Bocquet, H. (2013). Fiche Technique _la Chènevotte. 1 p.

Boisyvon, A. (2015). Comparatif des performances environnementales du béton et du béton de chanvre- Étude du cas de deux bâtiments d'habitation construits par Val Touraine Habitat à Nouzilly (37). 8 p. Repéré à www.cerema.fr

Börjesson, P., & Gustavsson, L. (2000). Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. Energy policy, 28(9), 575-588.

Bruxelles Environnement. (2010). Assurer une grande inertie thermique: choisir des matériaux lourds et les laisser en contact avec l'ambiance du local, pour disposer d'un tampon thermique important. 7 pages.
Repéré à http://app.bruxellesenvironnement.be/guide_batiment_durable/docs/ENE08_FR.pdf

Cablé, A. (2013). Étude expérimentale et numérique du traitement des ambiances par le vecteur air dans les bâtiments à très basse consommation d'énergie (Université de La Rochelle).

CECOBOIS. (2017). L'avantage environnemental des systèmes de construction en bois dans le contexte des changements climatiques. CECO-784_Fiche-avantage_enviro_WEB, pp.8. Repéré à https://www.cecobois.com

Chabaud, C. (2015). Les filières lin et chanvre au coeur des enjeux des matériaux biosourcés émergents. pp.90 .

Chabot, M. (2010). Construire avec du chanvre au Québec, écologis. 5.
Repéré à https://maisonsaine.ca/wp-content/uploads/2010/01/Chanvre.pdf

Chamoin, J. (2013). Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation (INSA de Rennes).

Chang, S. J., & Kim, S. (2015). Hygrothermal performance of exterior wall structures using a heat, air and moisture modeling. Energy Procedia, 78, 3434-3439.
doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.328

Cheng, A., Auerbach, M., Hunt, E. A., Chang, T. P., Pusic, M., Nadkarni, V., & Kessler, D. (2014). Designing and conducting simulation-based research. Pediatrics, peds. 2013-3267.

Ciarlo, S. D., Lalande, F., & Ste-Cyr, Y. (2008). Les différents types d'isolants et leur propriété physique, Exigence Codes de l'Énergie Québec et la nouvelle R de l'isolation. pp.113.

Citherlet, S., Clarke, J., & Hand, J. (2001). Integration in building physics simulation. Energy and Buildings, pp.33(5), 451-461.

CNEB. (2019). Code national de l'énergie pour les batiments- Canada 2015 incluant les modifications proposées par le projet de réglement modifiant le Code de constrction. pp.244.

Craven C., & Garber-Slaght R. (2014). Exterior insulation envelope retrofits in cold climates: Implications for moisture control , HVAC&R Res. . pp.20, 384–394.

Cérézo, V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.

Clark, J., & Daigle, G. (1997). The importance of simulation techniques in ITS research and analysis. Dans Proceedings of the 29th conference on Winter simulation (pp. 1236-1243). IEEE Computer Society.

Collet, F. (2004). Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux. Institut National des Sciences Appliqu ées de Rennes.

Commission de Coopération Environnementale. (2008). Le bâtiment écologique en Amérique du Nord : Débouchés et Défis. 80. Repéré à https://www.google.ca/search?biw=1252&bih=579&ei=XeeHXPHgIoe9jgSt5KXoCA&q=www3.cec.org%2F...%2F2335-green-building-in-north-america-opportunities-and-challenges...&oq=www3.cec.org%2F...%2F2335-green-building-in-north-america-opportunities-and-challenges...&gs_l=psyab.3...2428220.2428220..2428972...0.0..0.110.110.0 j1.....0....2j1.. gws-wiz.8oPqctsHyBY

Conseil canadien des Ministres des Forets. (s.d). Contruction Ecologique : Les Avantages du Bois Fiche d'Information, 2. Repéré à WWW.SFMCANADA.ORG

Conseil canadien du Bois Québec. (s.d). La construction hybride bois-béton. International: Série du bâtiment, No 9, 20.

D.Zirkelbach, Th.Schmidt, M.Kehrer, & Kunzel, H. M. (s.d). WUFI Pro-Manual. 43.

Daïan, J.-F. (2010). Équilibre et transferts en milieux poreux I-Etats d'équilibre.

Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. (2017). Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings.

Derome, D. (2005). Moisture accumulation in cellulose insulation caused by air leakage in flat wood frame roofs. *Journal of Building Physics*, pp.28(23), 269-287.

Desmarais, G. (2000). Impact of added insulation on the hygrothermal performance of leaky exterior wall assemblies, Master's Thesis, Concordia University, Montreal, Canada.

Désaunay Cécile, & Jouvenel François. (2014). Produire et consommer à l'ère de la transition écologique, Disponibilité des ressources naturelles : état des lieux mondial. Futuribles, pp.34. Repéré à https://www.futuribles.com/viewer/pdf/7738

Eco-habitation. (s.d). Découvrez les programmes résidentiels de transition énergétique Québec- ecohabitation- la ressource en habitation écologique. NOVCLIMAT. Repéré à http://www.ecohabitation.com/annuaire/index.php?path=2.2.0&id_page=12

Elmahdy, A. H., Maref, W., Saber, H. H., Swinton, M. C., & Glazer, R. (2010). Assessment of the energy rating of insulated wall assemblies - a step towards building energy labeling *10th International Conference for Enhanced Building Operation, Kuwait,*, pp. 1-12.

Elmahdy, A. H., Maref, W., Swinton, M. C., Saber, H. H., & Glazer, R. (2009). Development of energy ratings for insulated wall assemblies. 2009 Building Envelope Symposium (San Diego, CA., October-26-09), pp. 21-30

Environnement et Changement Climatique Canada. (2018). Indicateurs Canadadiens de durabilité de l'environnement: Émissions de gaz à effet de serre. pp.24. doi:www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html

Evrard Arnaud, & De Herde André. (2010). LE BÉTON ET LA CONSTRUCTION DURABLE, PROJET CONTEXTUALISER, LA DURABILITE.

Ferreira, C., de Freitas, V. P., & Ramos, N. M. (2014). Quantifying the Influence of Hygroscopic Materials in the Fluctuation of Relative Humidity in Museums Housed in Old Buildings. Dans NSB 10th Nordic Symposium on Building Physics (Vol. 74, pp. 600-607).

Filion, J.-P., & Garon, J. (2013, Avril-Mai 2013). Québec-habitation : Critères et Exigences Le magazine de la construction et de la rénovation, 30(N° 2), pp.40.

Fox M. (2014). Hygrothermal performance of highly insulated wood frame walls with air leakage : field measurement and simulations, Master's Thesis, Ryerson University, Toronto, Canada, .

François, S., Radanne, P., & Diaz, E. (2012). NECTAR :Étude sur les bâtiments pour les négociations sur le changement climatique dans le cadre du régime post 2012. Organisation internationale de la francophonie, pp.27.

Frenette, C. D. (2009). Analyse multicritère des compositions de mur à ossature légère en bois (Citeseer).

Fruchard, E. (s.d). Caractéristique du chanvre -Charpente Eddy FRUCHARD. pp.3.

Gauthier, G. (2018). Art Can- Construction en chanvre.
Repéré à http://maisonenchanvre.com/avantages-du-chanvre/

Ge, H., & Baba, F. (2015). Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building. Energy and Buildings, Vol.105, 106-118.
doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.023

Gerber, I. (2005). Description des forces de Van der Waals dans le cadre de la théorie de la fonctionnelle de la densité par un traitement explicite des interactions de longue portée (Université Henri Poincaré-Nancy I).

Ge, H., Straube, J., Wang, L., & Fox, M. J. (2019). Field study of hygrothermal performance of highly insulated wood-frame walls under simulated air leakage. *Building and Environment*. doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106202

Gilbert Riopel, & Marie-France Bélec. (2016). LA RÉSISTANCE THERMIQUE EFFECTIVE ET LES IMPACTS DES PONTS THERMIQUES. 7e COLLOQUE SUR L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT, pp.58.
Repéré à https://www.cebq.org/wp-content/uploads/2016/04/La-re%CC%81sistance-thermique-effective-et-les-impacts-des-ponts-thermiques.pdf

Glass, S., Kochkin, V., Drumheller, C. S., & Barta, L. (2015). Moisture performance of energy-efficient and conventional wood-frame wall assemblies in a mixed-humid climate, Buildings. pp. 5, 759- 782, .

Glé, P. (2013). Acoustique des matériaux du bâtiment à base de fibres et particules végétales-outils de caractérisation, modélisation et optimisation (INSA de Lyon).

Goldstein, C., Leisten, S., Stark, K., & Tickle, A. (2005). Using a network simulation tool to engage students in active learning enhances their understanding of complex data communications concepts. Dans Proceedings of the 7th Australasian conference on Computing education-Volume 42 (pp. 223-228). Australian Computer Society, Inc.

GOURLAY, E., & ARNAUD, L. (2011). Des matières premières au béton de chanvre: optimisation des propriétés thermiques et mécaniques. 20ème Congrès Français de Mécanique, 28 août/2 sept. 2011-25044 Besançon, France (FR).

Govaerts, Y., Hayen, R., de Bouw, M., Verdonck, A., Meulebroeck, W., Mertens, S., & Grégoire, Y. (2018). Performance of a lime-based insulating render for heritage buildings. Construction and Building Materials, pp.159, 376-389. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.115

Goverse, T., Hekkert, M. P., Groenewegen, P., Worrell, E., & Smits, R. E. (2001). Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints. Resources, Conservation and Recycling, pp.34(1), 53-74.

Granier, T., & Youlou, S. (2014). Présentation du programme de l'association la Voûte Nubienne (AVN): 15 ans de recherche et d'application au service de la filière d'un habitat adapté. pp.28.

GROUPE ORVERT LTÉE. (2013). GROUPE ORVERT LTÉE Pour une solution durable aux changementsclimatiques, Mémoire présenté dans le cadre de la commission sur l'avenir énergétique du Québecà Shawinigan. pp.14. Repéré à https://mern.gouv.qc.ca

Gustavsson, L., & Sathre, R. (2006). Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. Building and Environment, pp.41(7), 940-951.

Hauglustaine, J.-M., & Simon, F. (2006). La Conception Globale de l' Enveloppe et l'Énergie / Guide pratique pour les architectes. pp.102.

Hauglustaine, J.-M., Simon, F., Baltus, C., & Liesse, S. (2006). La conception Globale de l'enveloppe et l'énergie : Guide pratique pour les architectes. Ministere de la région Wallonne, pp.102.

Institut de la statistique du Québec. (2014). Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2011-2061. Institut de la statistique du Québec, Édition 2014(Québec), pp.125. doi: www.stat.gouv.qc.ca. Repéré à ISBN 978-2-550-71321-0

IRIS, I. d. R. I. e. S., & GRIP. (2017). Rapport d'étude n0 2, Données scientifique et scenarios climatiques. Observatoir Defense et Climat, Rapport d'étude n° 2, pp.85.

Jaffel, H. (2006). Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution: cas du plâtre (École Polytechnique X).

Janssens A. and Hens H. (2003). Interstitial condensation due to air leakage: A sensitivity analysis. *Journal of Building Physics*, pp.27(21) 15-29.

Jordan Cieski. (s.d). Matériaux Biosourcés, comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre. pp.34.
Repéré à https://seminairemateriaux.files.wordpress.com/2014/06/r9-mc3a9moire.pdf

Karagiozis, A. N., & Salonvaara, M. K. (1999). Hygrothermal performance of EIFS-clad walls: Effect of vapor diffusion and air leakage on the drying of construction moisture, in: J. M. Boyd, & M. J. Scheffler (Eds.), ASTM STP1352. Water problems in building exterior walls: Evaluation, prevention and repair, West Conshohocken, PA, . pp. 32-59.

Kari, B., Perrin, B., & Foures, J. C. (1992). Modélisation macroscopique des transferts de chaleur et d'humidité dans des matériaux du bâtiment. 8 pages.

Knarud, J. I., & Geving, S. (2017). Comparative study of hygrothermal simulations of a masonry wall. Energy Procedia, pp.132, 771-776.

Krus, M., Theuerkorn, W., GroBkinsky, T., & Kunzel, H. (2014). New sustainable And insulating building material made of cattail. Full papers NSB, vol.156, pp.1252-1260. Repéré à https://wufi.de/.../Krus,%20Theuerkorn%20et%20al%202014%20-...

Künzel, H. M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components : One-and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart Fraunhofer IRB Verlag Suttgart 1995, pp.65.

Künzel, H. M. (2012). Modeling Air Leakage in Hygrothermal Envelope Simulation. BEST 3 Conference Atlanta 2012, (Fraunhofer IBP Germany), pp.26.

Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J.-J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp.15(1), 379-391.

Lacasse, M. A., Saber, H. H., Maref, W., Ganapathy, G., Plescia, S., & Parekh, A. (2016). Field evaluation of thermal and moisture response of highly insulated wood-frame walls. The 13th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole, Buildings XIII, held in Clearwater, Florida, USA.

Langmans, J., Klein, R., & Roels, S. (2012). Hygrothermal risks of using exterior air barrier systems for highly insulated light weight walls: A laboratory investigation. Building and Environment, pp. 56, 192-202.

Lamalle, M. (2016). Bloc de béton de bois, une alternative au bloc traditionnel? - Etude des caractéristiques mécaniques, thermiques et écologiques d'un bloc de coffrage en béton de bois. pp.172.

Latif, E., Ciupala, M. A., Tucker, S., Wijeyesekera, D. C., & Newport, D. J. (2015). Hygrothermal performance of wood-hemp insulation in timber frame wall panels with and without a vapour barrier. Building and Environment, pp.92, 122-134.

Latif, E., Lawrence, M., Shea, A., & Walker, P. (2015). Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. Building and Environment, pp.93, 199-209.

Le FOREM et CIFFUL, IFAPME, CSTCbe, & Wallonne, F.-F. (2013). Le point, les techniques et la mesure de l'étanchéité à l'air Le FOREM et CIFFUL (pp. 04).

Lenardo, B. D., Maref, W., & Saber, H. H. (2011). Impact of air leakage on hygrothermal and energy performance of buildings in North America. Part II: CCMC evaluation of air barriers. 13th Canadian Conference of Building Science and Technology Conference. Workshop (Winnipeg, Manitoba, May 10, 2011), (ORAL-1080), pp. 1-26.

Lelièvre, D. (2015). Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés. Science des matériaux, 184 pages.

Lille, M. (2013). TRANSFERTS D'HUMIDITÉ À TRAVERS LES PAROIS EN RÉNOVATION. pp.120.

Liuzzi, S., Sanarica, S., & Stefanizzi, P. (2017). Use of agro-wastes in building materials in the Mediterranean area: a review. Energy Procedia, 126, 242-249.

Maref, W. (2007). Performance hygrothermique des systèmes de murs et fenêtres conseil national de recherches Canada, pp50.

Maref, W., Armstrong, M. M., Rousseau, M. Z., & Lei, W. (2010). A field monitoring investigation of the effect of adding different exterior thermal insulation materials on the hygrothermal response of wood-frame walls in a cold climate", in: Proceedings of the Building Enclosure Science & Technology (BEST2) Conference, Portland, OR, USA, .

Maref, W., H.H., S., R., G., M.M., A., M., N., & Elmahdy A.H. and Swinton M.C. (2011). Energy performance of highly insulated wood-frame wall systems using a VIP. *10th* International Vacuum Insulation Symposium (Ottawa, Ontario, September-15-11), pp. 68-76

Maref, W., & Mukhopadhyaya, P. (2003). La modélisation - un outil pour évaluer la performance hygrothermique des murs. NRC Publications Archive: Archives des publications du CNRC, ORAL-626F, pp.61. Repéré à http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?action=rtdoc&an=5204772&lang=en
http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?action=rtdoc&an=5204772&lang=fr

Maref, W., Saber, H. H., Elmahdy, H., Swinton, M. C., Glazer, R., & Nicholls, M. (s.d). La performance hygrothermique et énergétique de l'enveloppe des batiments: Partie II:

Cote énergétique des murs isolés. Séminaire #197 du CEBQ-OAQ (Conseil de l'enveloppe du batiment du Québec-Ordre des Architectes du Québec) (Montréal (Québec), (ORAL-1124) pp. 1-46.

Maref W. (2011). Impact of air leakage on hygrothermal and energy performance of buildings in North America. 13th Canadian Conference on Building Science and Technology. Workshop. (Winnipeg, Manitoba, May 10, 2011), (ORAL-1084), pp. 1-2.

Maref W. (2015a). Les risques de condensation et de moisissure dans les assemblages muraux, Partie I – Effet de la permeance de la vapeur d'eau du matériau sur la performance hygrothermique des murs, Séminaire CEBQ # 216 sur l'enveloppe du bâtiment, Montréal, Qc, .

Maref W. (2015b). Les risques de condensation et de moisissure dans les assemblages muraux, Partie II – Le propriétés et le posionnement du matériau dans l'enveloppe du bâtiment : maisons et petits bâtiments", Séminaire CEBQ # 216 sur l'enveloppe du bâtiment, Montréal, Qc.

Maref W. (2018). Thought on tightness``, FORMES Magazine: Thoughtful Building Envelope (Une envelope bien pensée), FORMES Vol. 14, N 2 - 2018.

Maref., W. (s.d). La performance hygrothermique et énergétique de l'enveloppe des batiments: Partie I: effet de l'amélioration de l'efficacité énergétique des murs sur leur capacité de séchage, Séminaire #197 du CEBQ-OAQ (Conseil de l'enveloppe du batiment du Québec-Ordre des Architectes du Québec) (Montréal (Québec) pp. 1-89, (ORAL-1123)

Maref., W., Armstrong., M. M., Rousseau., M. Z., Nicholls., M., Ganapathy., G., & Lei., W. (2011). Impact of air leakage on hygrothermal and energy performance of buildings in North America. Part IV: characterization of hygrothermal performance of wall systems. 13th Canadian Conference of Building Science and Technology Conference. Workshop (Winnipeg, Manitoba, May 10, 2011), (ORAL-1082), pp. 1-78,. Repéré à http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/oral1082.pdf

Maref., W., H.H., S., A.H., E., M.C., S., R., G., & M., N. (2011). Impact des fuites d'air sur la performance hygrothermique et énergétique des bâtiments en Amérique du Nord: cote énergétiques es murs isolés. Assemblée Générale Annuelle (AGA) de l'association Canadienne des entrepreneurs en mousse de polyuréthane (Laval (Québec), April 15, 2011), pp. 1-48, (ORAL-1078) pp. 1-48.

Maref., W., & Saber., H. H. (2011). Impact of air leakage on hygrothermal and energy performance of buildings in North America. Part I: heat, air and moisture control strategies for managing condensation in walls. 13th Canadian Conference of Building

Science and Technology Conference. Workshop (Winnipeg, Manitoba, (ORAL-1079) May 10, 2011), pp. 1-42.

Maugard, A. (2013). Evaluation des risques de pathologies liées à l'humidité, Au niveau des poutres encastrées dans un mur exterieur isolé par l'interieur. Grenelle Environnement 2012, 44.page.
Repéré à www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

Marc Chabot. (2010). Construire avec du chanvre au Québec, écologis. 5.
Repéré à https://maisonsaine.ca/wp-content/uploads/2010/01/Chanvre.pdf

Mazhoud, B., Collet, F., Pretot, S., & Chamoin, J. (2016). Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters. Building and Environment, pp.96, 206-216.

Mchirgui, W. (2012). Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique: Application aux matériaux cimentaires (Université de La Rochelle).

Ministry of Municipal Affaires and Housing. (2019). Ontario Ministry of Municipal Affairs and Housing, Ontario Building Code, Online resources.
Repéré à http://www.mah.gov.on.ca/Page7393.aspx,

Michel Martin. (1998). L'ADOBETON UNE TECHNOLOGIE APPROPRIEE POUR UN HABITAT ECONOMIQUE AMELIORE. pp. 11.

Moissette, S., & Bart, M. (2009). VALIDATION D'UN CODE DE TRANSFERT DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ DANS UNE PAROI SELON LA NORME EN 15026. Dans IXème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la thermique des Systèmes (pp. ART-23).

Morrell, J. (2002). Wood-based building components: what have we learned? International biodeterioration & biodegradation, pp.49(4), 253-258.

Nathalie, F. (2017). Plan Filière de l'interprofession du chanvre. pp.20.
Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca

Natterer, J. (2004). Construction en bois: matériau, technologie et dimensionnement (Vol. 13). PPUR presses polytechniques.

Niyigena, C. s. (2016a). Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne (Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II). (2700).

Niyigena, C. s. (2016b). Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne (Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).

Norme Européenne ILNAS-EN 15026. (2007). Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments Évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique. . EN 15026:2007 F. AFNOR.
Repéré à https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15026/performance-hygrothermique-des-composants-et-parois-de-batiments-evaluation-du-transfert-d-humidite-par-simulation-numerique/article/691436/fa119083

ONUDC. (2007). Nations Unies, Office contre la drogue et le crime: le cannabis en Afrique pp.22. Repéré à www.unodc.org

Ojanen, T., & Kumaran, K. (1996). Effect of exfiltration on the hygrothermal behaviour of residential wall assembly. J. Thermal Insul. and Bldg. Env., pp.19, 215-227.

Ojanen, T., & Kumaran, M. K. (1992). Air exfiltration and moisture accumulation in residential wall cavities. Thermal Performance of Exterior Envelopes of Buildings V, Clearwater, FL,.

Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp.16(6), 3559-3573.

Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., & Strykowski, W. (2014). Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. Construction and Building Materials, 52, 428-436.

Paméla NOËL. (2018). Évaluation du confort thermique à la suite d'abaissements de la température de consigne des thermostats en mode chauffage à l'aide de données mesurées in situ et de simulations. pp.157.

Parsons, G., & Lieburn, B. (2013). Comparative energy and wall performance of twelve residential houses constructed in a cold climate in: Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference, Clearwater Beach, FL, USA,.

Popovic, D. (s.d). Comment bati une maison en chanvre? Repéré à https://www.chanvrequebec.com/blog/construction/comment-construire-en-chanvre/

Pronovost, I. (2017). Art du chanvre, une entreprise qui conjugue beauté et respect de l'environnement. Repéré à https://www.index-design.ca/article/art-du-chanvre-une-entreprise-qui-conjugue-beaute-et-respect-de-l-environnement

Puymbroeck, B. V., & Janssen, I. A. (2012). Impact de l'étanchéité à l'air pour des constructions massives, construites à grande échelle. Revue Scientifique des ISILF, (numéro 26), 17.

Rabehi, M. (2014). Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage par l'utilisation des tests d'absorption capillaire (Université Mohamed Khider Biskra).

Rahim, M., Douzane, O., Le, A. T., & Langlet, T. (2016). Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials. Construction and Building Materials, pp.111, 119-127.

Rahim, M., Douzane, O., Le, A. T., Promis, G., Laidoudi, B., Crigny, A., . . . Langlet, T. (2015). Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. Energy and Buildings, pp.88, 91-99.

Rahim, M., Douzane, O., Le, A. T., Promis, G., & Langlet, T. (2016). Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete. Construction and Building Materials, pp.102, 679-687.
doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021

Régie du bâtiment du Québec. (2012). Présentation sur le règlement modifiant le code de construction pour favoriser l'efficacité énergétique / partie 11: «Efficacité énergétique » du chapitre I - Bâtiment et code national du bâtiment- canada 2005 (modifié): code de construction du Québec / Régie du bâtiment du Québec, 119.

Ressources naturelles Canada. (2016). Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. Inventaire Québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2014 et leur évolution depuis 1990. 32.
Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2014/Inventaire1990-2014.pdf

Ressources naturelles Canada. (2016-2017). Cahier d'information sur l'énergie 2016-2017. Ressources naturelles Canada, p.140.

Ressources naturelles Canada. (2018a). Demande en produit forestiers, Principales exportations : bois d'oeuvre résineux. Gouvernement du Canada.
Repéré à https://www.rncan.gc.ca/forets/industrie/demandes/13318

Ressources naturelles Canada. (2018b). Le bois pour convertir notre environnement bâti au vert: Reconnaissance de la construction en bois dans nos codes du bâtiment. Gouvernement du Canada.
Repéré à https://www.rncan.gc.ca/forets/industrie/demandes/16835

Rhônalpénergie-Environnement. (s.d). Maitrise des transferts d'humidité dans les parois. 7.

Alev, U., Uus, A., Teder, M., Miljan, M. J., & Kalamees, T. (2014). Air leakage and hygrothermal performance of an internal insulated log house. the 10th Nordic Symposium on Building Physics, Lund, Sweden.

Saber H. H., & Lacasse M. A. and Moore, T. V. (2017). Hygrothermal Performance Assessment of Stucco-Clad Wood Frame Walls Having Vented and Ventilated Drainage Cavities, Advances in Hygrothermal Performance of Building Envelopes: Materials, Systems and Simulations, ASTM STP1599, ASTM International pp. 198–231. doi: http://dx.doi.org/10.1520/STP159920160100.
Repéré à https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP159920160100.htm

Saber H.H., Maref W., Elmahdy A.H., & Swinton M.C. and Glazer R. (2012). 3D heat and air transport model for predicting the thermal resistance of insulated wall assemblies. Journal of Building Performance Simulation, vol. 5 no. 2, pp. 75-91.

Saber, H. H., Lacasse, M. A., Ganapathy, G., Plescia, S., & Parekh, A. (2016). Risk of condensation and mould growth in highly insulated wood-frame walls. The 13th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole, Buildings XIII, held in Clearwater, Florida, USA,.

Saber, H. H., & Maref, W. (2015). Risk of condensation and mould growth in wood-frame wall systems with different exterior insulations. Building Enclosure Science & Technology Conference (BEST4 Conference), held in April 12-15, 2015, Kansas City, Missouri, USA.

Saber, H. H., Maref, W., & Abdulghani, K. (2014). Properties and position of materials in the building envelope for housing and small buildings Report No. A1-004615.1, NRC-Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada,.

Saber, H. H., Maref, W., Elmahdy, A. H., & Swinton M.C. and Glazer, R. (2010). 3D thermal model for predicting the thermal resistance of spray polyurethane foam wall assemblies. 11th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, Clearwater, FL, USA, pp. 1-19.

Saber., H. H., & Maref, W. (2019). Field Research Study for Investigating Wetting and Drying Characteristics in Wood-Framing Walls Subjected to Cold Climate, accepted at Journal of Building Physics.

Smegal, J., Lstiburek, J., Straube, J., & Grin, A. (2013). Moisture-related durability of walls with exterior insulation in the pacific northwest. in: Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference, Clearwater Beach, FL, USA,.

Samri, D. (2008). Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique. École Nationale des Travaux Publics de l'État (2008-ISAL-0067), 2008.

Sanders, C., Hermann, C., & Baker, P. (2014). Hygrothermal assessment of wind-driven rain as a risk for internal insulation retrofit of traditional buildings'. Dans 10th Nordic Symposium on Building Physics (Vol. vol.131, pp. 854-863).

Scheifel, G., Bill, W. J., & Kemptville. (2000). La culture du chanvre industriel. Repéré à http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/00-068.htm

SCHL. (2013). Construction de maison a ossature de bois- Canada_ Édition révisée. Ressource Naturelles Canada, NH17-3/2005F(ISBN 0-660-19535-6), 357. Repéré à www.schl.ca

Schlueter, A., & Thesseling, F. (2009). Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. Automation in construction, 18(2), 153-163. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.07.003

Schonfeld, S., & Radelli, A. (2014). Comprendre la COP21 et les négociations internationales sur le Climat. PARIS2015 COP21-CMP11, (5éme Rapport du GIEC, 2014), 64.
doi: http://www.cop21.gouv.fr http://unfccc.int/portal_francophone/items/3072.php http://www.developpement-durable.gouv.fr

Seddik, M. (2006). Modélisation des structures en bois en environnement variable (Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 26 septembre).

Shea, A., Lawrence, M., & Walker, P. (2012). Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building. Construction and Building Materials, 36, 270-275.

Sosthène, N. (2006). Développement des matériaux locaux dans la construction au Burkina Faso: perspectives d'avenir. 116.

Sotehi, N. (2010). Caractéristiques thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation. Univ. Mentouri-Constantine.

Sottile, M.-F. (2011). L'influence des changements climatiques sur la qualité de l'air. OURANOS, Developpement durable, Environnement et Parc Québec, 42.

Soubeyrand, E. (2012). Adsorption et séparation de gaz en mode dynamique sur des matériaux hybrides (Aix-Marseille).

Sozer, H. (2010). Improving energy efficiency through the design of the building envelope. Building and Environment, 45(12), 2581-2593.

Stahl, T., Wakili, K. G., Hartmeier, S., Franov, E., Niederberger, W., & Zimmermann, M. (2017). Temperature and moisture evolution beneath an aerogel based rendering applied to a historic building. Journal of Building Engineering, 12, 140-146. doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.05.016

Stephen McNeil, B. (2017). Enhanced source and sink ventilation model for WUFI. 15th Canadian Conference on building science and technology, Vancouver, 69, 13. Repéré à http://www.bepassive.be/bonus/_details/wufi2d.pdf

Straube, J. (s.d). L'enveloppe du bâtiment haute performance en béton préfabriqué le contrôle de la pluie. Building Science Corporation, 48 p. Repéré à www.buildingscienceconsulting.com

Theresa Weston, P., Ernest Kortschak, P. E., & Maria Spinu, P. (2017). Risk assessment of water accumulation in walls with exterior continuous insulation. 85, 18.

Thibault, H.-L., & El Andaloussi, E. H. (2011). L'efficacité énergétique dans le bâtiment en Méditerranée. Futuribles, 376, 47-59. Repéré à http://www.futuribles-revue.com

Ueno K. (2015). Monitoring of double-stud wall moisture conditions in the northeast Building America Report 1501, Building Science Corporation: Westford, MA, USA,.

Upton, B., Miner, R., Spinney, M., & Heath, L. S. (2008). The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States. Biomass and Bioenergy, 32(1), 1-10.

Varenio, C. (2012). L'efficacité énergétique dans les bâtiments existants: déficit d'investissement, incitations et accompagnement (Université de Grenoble).

Véringa, S. (2015). Les briques de chanvre pourraient révolutionner nos constructions. Repéré à https://www.espritsciencemetaphysiques.com/chanvre-pourrait-revolutionner-constructions.html

Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2018). Etat de l'énergie au Québec_ Année 2018, Chaire de gestion du secteur de l'énergie HEC MONTRÉAL. pp.56.

Wyss, U., & coopération, S. D. d. d. e. d. l. (2005). La construction en" matériaux locaux": état d'un secteur à potentiel multiple.

Youssef, A. (2017). Prise en compte des apports mécaniques du béton de chanvre pour le calcul de structure bois/béton de chanvre et métal/béton de chanvre (Lorient).

Zaknoune, A., Glouannec, P., Salagnac, P., & Le Bideau, P. (2010). Estimation des coefficients de diffusion hydrique de matériaux du bâtiment lors du séchage. Dans Société française de thermique (Vol. 18, pp. 693-698).